PERCHÉ LA COSCIENZA?

un'evoluzione inevitabile per organismi biologici e artificiali

Neri ACCORNERO Marco CAPOZZA

EBOOK 2023

INDICE

1. Introduzione ..... Errore. Il segnalibro non è definito.
2. Riassunto **10**
3. Voi siete qui **14**
4. Sistemi complessi **16**
5. Definizioni **19**
6. Consapevolezza **26**
7.Verifica di consapevolezza **38**
8. Evoluzione **41**
9. Luci e suoni **58**
10. L'altro replicante **60**
11. Auto-organizzazione **74**
12. Forma corporea **80**
13. Interazione ambientale **84**
14. Comunicazione **90**
15. Sistemi nervosi **95**
16. Immagini strumentali cerebrali **101**
17. Organizzazione del sistema nervoso **107**
18. Perché una mente **112**
19. Livelli funzionali gerarchici **114**
20. Le mani dell'uomo **136**
21. Il tempo **141**
22. Memoria e apprendimento **143**
23. Emozioni e Sentimenti **150**
24. Linguaggio e consapevolezza **163**
25. Libero arbitrio? **168**
26. Considerazioni riassuntive **171**
27. Il Connessionismo **176**
28. Learning-by-doing **190**
29. Neuroni canonici e neuroni specchio **201**
30. Sperimentazioni con reti neurali **207**
31. ALIFE **209**
32. GAZE **217**
33. ARM **227**
34. POSTURA **234**
35. ROOMS **239**
36. Conclusioni **254**
37. Bibliografia per argomenti **259**

1à edizione Maggio 2020

2à edizione Gennaio 2022

3à edizione Novembre 2023

4à edizione Febbraio 2025

1. INTRODUZIONE

Perché l'evoluzione su questo pianeta ha prodotto organismi consapevoli di esistere? Virus, batteri, piante, funghi, molluschi, celenterati e insetti vivono efficacemente ed in gran quantità da milioni di anni senza l'ombra d'una consapevolezza. Cosa spinge l'evoluzione a produrre sistemi nervosi sempre più complessi e ora pensanti? E questa "coscienza" in cosa consiste? Queste domande sono antiche come l'uomo e le risposte date finora non sono esaurienti. Nel nostro precedente libro (***COSCIENZA ARTIFICIALE dal riflesso al pensiero - Aracne editrice 2009,*** abbiamo proposto una spiegazione con la convergenza di tre diverse discipline: *neurobiologia, evoluzionismo e informatica*; in sintesi, *reti neurali artificiali e connessionismo evolutivo*. In questo secondo libro, ora alla quarta edizione, proponiamo una spiegazione più articolata e speriamo più comprensibile che potrebbe ridurre drasticamente e utilmente la presunzione di dominio che abbiamo su questo insignificante punto dell'universo.

Per la quasi totalità del genere umano permane la convinzione che la coscienza sia un processo misterioso e insondabile, e il pensiero religioso corre in soccorso per giustificare il mistero; ma quello che sorprende è che anche tra gli "addetti ai lavori", i neurologi e neurofisiologi, non vi sia accenno ad una spiegazione plausibile, e l'argomento venga tranquillamente taciuto. Nei testi per uso universitario non c'è ancora traccia di una spiegazione del funzionamento globale del sistema nervoso, mentre il dettaglio del funzionamento dei singoli neuroni è quasi ossessivo. Questo lascia spazio a filosofi e fisici

teorici che di questi tempi pensano di risolvere il problema con la fisica quantistica (che per alcuni aspetti assomiglia molto ad una religione!).

Nella prima parte del libro vengono ricordati sinteticamente i meccanismi evolutivi Darwiniani che hanno promosso e consentito lo sviluppo progressivo del sistema nervoso dagli organismi più semplici come gli anellidi (vermi) all'Homo Sapiens. La consapevolezza è un fenomeno biologico emerso per evoluzione naturale per fini autoconservativi e pertanto va studiato a questo livello. È già da molti anni che tutti gli strumenti cognitivi e tecnologici sono disponibili, e se si affronta il problema in quest'ottica improvvisamente il mistero scompare senza il bisogno di scomodare divinità o entanglement quantistici.

Nella parte centrale del libro presentiamo una descrizione **anatomo-funzionale** innovativa del sistema nervoso umano, nel suo complesso, che non trova ancora riscontro nelle pubblicazioni scientifiche più autorevoli. Questa descrizione si basa su osservazioni di anatomia comparata che dimostrano che le varie strutture neuronali cerebrali si sono modificate in modo non uniforme nel corso dell'evoluzione delle specie. La nostra prospettiva suggerisce una correlazione diretta tra queste modificazioni anatomiche progressive e l'incremento esponenziale delle strategie comportamentali che le specie hanno sviluppato per interagire utilmente con il proprio ambiente percepito.

Abbiamo definito "**tripletta associativa"**, una sequenza operativa nelle reti neuronali cerebrali costituita da due stati sensoriali e uno motorio tra loro correlati: *percezione di uno stato sensoriale iniziale, azione* o *evento nell'ambiente, e percezione della retroazione sensoriale conseguente all'azione* o *evento*. Questo processo, effettuato ripetutamente, consente un apprendimento automatico dei **nessi causali impliciti** negli *eventi percepiti*, inclusi il proprio comportamento e i suoi *effetti sulla propria persona e sull'ambiente*, con notevole vantaggio nelle scelte operative. A seconda del livello cerebrale in cui questo processo avviene si configurano comportamenti riflessi (riflessi condizionati associativi e operanti) o comportamenti intenzionali coscienti nelle specie più evolute. In queste uno o più degli elementi della tripletta possono essere costituiti da stati *sensoriali immaginati* invece che da stati sensoriali contestuali percepiti, con conseguente possibilità di prevedere le conseguenze del comportamento prima di effettuarlo, e quindi eventualmente modificarlo. Questo processo viene descritto dettagliatamente in alcuni capitoli del libro perché riteniamo sia cruciale per la comprensione del funzionamento globale del sistema nervoso.

Le funzioni cognitive su cui la consapevolezza si basa (ricordo, immaginazione, previsione, intenzione, attenzione, pensiero/ragionamento) si manifestano con una componente privata: la *sensazione* della propria attività mentale, ovvero il *sentimento*; e con una componente pubblica: il *comportamento*, l'interazione con l'ambiente. Per questo studio è quindi necessario valutare anche le variabili ambientali che entrano nel circuito retroattivo sensoriale percepito dall'individuo. Come dire "la consapevolezza non è *dentro* il cervello, ma nell'*interazione* del cervello, tramite il corpo, con l'ambiente".

In estrema sintesi:

1) I meccanismi evolutivi selezionano e promuovono ciecamente (Dawkins) tutte le nuove soluzioni strutturali e comportamentali che si manifestano casualmente alla nascita in ogni singolo individuo e che modificano e aumentano la sua probabilità di sopravvivenza e riproduzione nell'ambiente in cui vive.

2) L'ambiente cambia in continuazione per eventi naturali, ma anche in modo ricorsivo per la presenza di tutte le specie che lo popolano, che ne sfruttano le risorse e ne affrontano i pericoli, e questo riorienta continuamente la pressione evolutiva in ogni singola specie.

3) La comparsa evolutiva del sistema nervoso e la sua progressione hanno consentito dapprima una efficace reattività sensori-motoria geneticamente trasmessa (istinti e riflessi genetici) e successivamente la possibilità di **apprendimento individuale dei nessi causali tra gli eventi percepiti** nel corso della vita del singolo individuo, con notevole aumento della possibilità di sopravvivenza e riproduzione (riflessi condizionati).

4) La consapevolezza, ultima arrivata nell'evoluzione dei processi cognitivi, aumenta esponenzialmente le possibilità di sopravvivenza per la capacità di **valutare gli effetti sulla propria persona di eventi sensoriali contestuali o immaginati (percepiti, ricordati o previsti)**. Insomma è per salvare la pelle e riprodursi che la consapevolezza è comparsa. Il pensiero serve per agire meglio, e i risvolti etici e filosofici ne sono solo una conseguenza (non sempre utile!).

5) Il funzionamento di una rete di neuroni è stato ben compreso e validato da più di quarant'anni grazie a simulazioni informatiche (reti neurali artificiali) che hanno mostrato capacità di rappresentazione, riconoscimento, classificazione e trasformazione di pattern sensoriali in esecuzioni motorie molto simili a quelle biologiche, ma questo non è ancora diffusamente descritto nei testi di Neurologia.

Nella parte finale presentiamo una serie di esperimenti informatici di simulazione comportamentale con reti neurali artificiali (**connessionismo evolutivo**) che abbiamo effettuato nel corso di più di trent'anni della nostra attività universitaria. Questi esperimenti confermano l'universalità e potenza dei processi evolutivi, che sono applicabili anche ad "organismi" artificiali quando debbano interagire con ambienti complessi, artificiali o naturali, con evoluzione di soluzioni molto simili a quelle biologiche e con risultati a volte sorprendenti.

Abbiamo infine introdotto qualche considerazione sulla interazione tra uomo e intelligenze artificiali, con vantaggi e svantaggi, includendone la pericolosità, soprattutto alla luce dei notevoli risultati che gli ultimi sistemi del tipo openAI (chat GPT) o di generative AI (Wall-e 2 e 3) stanno mostrando. Nelle conclusioni abbiamo anche suggerito quali possano essere i passi che potrebbero produrre organismi artificiali *senzienti,* nel bene e nel male che questo comporti per la specie H. Sapiens, perché

probabilmente siamo in procinto di una **rivoluzione mentale** ben più imprevedibile di quella **industriale** di più di un paio di secoli fa.

Questo libro è un ebook multimediale che contiene immagini animate e brevi filmati che sono indispensabili per apprezzare il comportamento dei modelli connessionisti che vengono presentati. È scaricabile in due versioni, EPUB3 e PDF in quest'ultima però si perdono le animazioni, anche se è disponibile nella stessa sezione una presentazione PPSX con la selezione delle immagini animate scaricabile. È anche disponibile una versione inglese (kindle, non multimediale) su Amazon.

La fisica del secolo scorso ha appurato che massa (materia) ed energia sono due aspetti della stessa entità, anche se ancora a nessuno è chiaro cosa questo significhi! Ed attualmente, nell'attesa di accertare se esista e cosa sia la *materia oscura*, possiamo definire cinque stati della materia che mostrano proprietà assai diverse: solido, fluido, gassoso, stato di plasma e biologico. Questi stati non vanno considerati compartimenti stagni, ed esistono condizioni nelle quali si osserva una transizione progressiva dall'uno all'altro: l'esempio più eclatante è quello dell'acqua, che in base a temperatura e pressione passa con continuità dal primo al quarto. Più difficile è definire il passaggio dai primi due al quinto, anche se tra le strutture più piccole che si autoreplicano senza variazioni (cristalli) e quelle molto più grandi che si replicano con variazioni (DNA, RNA) ci sono molti punti in comune.

Una delle differenze importanti che diversificano le proprietà fisiche di questi stati è il grado di mobilità dei loro componenti subatomici, atomici e molecolari. Con questo criterio, partendo dai più mobili fino a quelli meno mobili, gli stati si dovrebbero collocare in questa sequenza: plasmatici (elettroni liberi), gas (atomi liberi), fluidi (molecole libere), biologici (molecole collegate, interagenti, mobili), solidi (molecole quasi rigidamente collocate). Se invece dovessimo seguire un criterio di *complessità* ovviamente lo stato biologico sarebbe il maggiore ed evolutivamente l'ultimo arrivato.

Perché rimarcare questi concetti quando l'obiettivo di questo libro è il comportamento cosciente? Perché pensiamo che accettando che tutti gli organismi biologici, uomo compreso, siano un particolare stato della materia, non qualcosa di qualitativamente diverso, sia più facile accettare che i comportamenti cognitivi siano proprietà espresse dalla materia, organizzata in modo complesso, al pari di proprietà più semplici quali la rigidità espressa dai solidi o la fluidità dai liquidi. Per molti è difficile accettare che comportamenti astratti come il pensiero siano proprietà che emergono dallo stato dinamico di una moltitudine di unità materiali mutuamente connesse (neuroni), singolarmente del tutto inconsapevoli del risultato della loro coattivazione; ma questa è la realtà, che piaccia o meno. Confidiamo che procedendo nella lettura si riesca a comprendere che non c'è nulla di trascendente nel comportamento di organismi anche molto evoluti come l'Homo Sapiens, anche se questo appare stupefacente.

La copertina qui sopra è del nostro precedente libro, più tecnico e dettagliato nella spiegazione dei modelli connessionisti sviluppati e dei loro risultati, indirizzato a lettori già equipaggiati di conoscenze neurofisiologiche e informatiche interessati alla modellistica di strutture neurologiche.

Questo secondo libro ha invece un intento divulgativo anche se con livelli diversi nelle sue tre parti. In particolare vorremmo suscitare interesse in questo campo nelle menti più giovani e curiose, perché riteniamo che se queste conoscenze raggiungessero una porzione consistente della popolazione potrebbero modificare in modo rilevante la percezione della presenza dell'uomo e dei suoi comportamenti su questo pianeta, ed i risvolti sociali e politici potrebbero essere più importanti di quanto si potrebbe in prima istanza supporre. La globalizzazione sta costruendo comunità multietniche sia fisicamente che virtualmente collegate. Se la trasmissione culturale viene limitata o impedita, come tendono a fare le religioni, in particolare quelle monoteiste, o alcune parti politiche, diventano inevitabili ghettizzazioni, razzismo e xenofobia, tutte radici di violenza. Se invece tutte le conoscenze scientificamente provate venissero trasmesse fin dalla prima infanzia senza commenti etici o morali, nella forma più idonea per farle assimilare progressivamente e con piacere dai piccoli del genere umano, e si riconducessero tutte le religioni a *miti*, quali sono considerate quelle più primitive, insegnando invece le evidenze del cammino evolutivo dalla prima cellula all'Homo Sapiens, forse prepareremmo un mondo migliore.

Com'è noto le menti giovani sono esposte più di quelle degli adulti ad apprendimenti dogmatici, che una volta assimilati tendono a produrre comportamenti quasi istintivi senza critica o ragionamento, nel bene e nel male. "Datemi un bambino nei primi sette anni di vita e io vi mostrerò l'uomo" (intendendo uomo di fede), recita un celebre motto Gesuita. Terribile, non vi sembra? Riteniamo che gli apprendimenti dogmatici rappresentino una sorta d'infezione culturale *memetica*, (Dawkins, vedi più avanti), che dovrebbe essere trattata alla stregua delle infezioni virali biologiche, tramite vaccini o anticorpi culturali somministrati il più presto possibile alla popolazione giovanile, rinunciando a farlo negli adulti o anziani. Un adulto infettato difficilmente *guarirà*, perché dovrebbe rinnegare, con sofferenza, buona parte delle credenze sulle quali ha costruito la sua vita personale e sociale.

Gli anticorpi principali a nostro avviso dovrebbero essere almeno questi:

- Abituare a distinguere i messaggi che descrivono *fatti* da quelli che raccontano *storie*.

- Incoraggiare a chiedere le prove di quanto contenuto nei suddetti messaggi ed esercitare frequentemente la curiosità. *Capire* è meglio che *sapere.*

- Considerare che le spiegazioni scientifiche sono provvisorie e suscettibili di cambiamenti (ed è bene che siano tali) ed accettare questa provvisorietà.

Pensiamo che un approccio culturale di questo tipo possa contribuire a formare buone difese contro l'apprendimento per fede. Questo vale anche per le conoscenze scientifiche, poiché anche in questo ambito i dogmi bloccano lo sviluppo di nuove conoscenze e alimentano anche qui i fondamentalismi dannosi.

L'idea che la coscienza, da molti ritenuta esclusiva della specie Homo Sapiens, si sia formata per evoluzione, e sia quindi comparsa e sia presente in modo graduale e diffuso nelle varie specie, si scontra soprattutto con due resistenze: il dispiacere di perdere la visione antropocentrica di supremazia dell'Uomo, con l'autogratificazione e l'autoperdono etico ad essa connessi; e l'incredulità che funzioni tanto sofisticate possano emergere spontaneamente per *semplice* evoluzione.

Circa la prima possiamo fare ben poco, salvo credere che chi è stato incuriosito da questo libro possieda l'onestà intellettuale che non lo farà fermare da simili convenienze. Per la seconda invece varrà la pena di spendere qualche parola in più, considerando che influenti forze sociali, segnatamente quelle religiose, fanno di tutto per alimentare confusioni ed incertezze sul tema dell'evoluzione, anche giocando sul termine *teoria* dell'evoluzione.

La tecnologia corre, la scienza meno. Si sa che una nuova conoscenza che non abbia un'immediata ricaduta nella pratica quotidiana dev'essere sedimentata nella mente di molti, dev'essere validata da sperimentazioni e formalizzata in modo da essere trasmessa senza troppi errori. Ma più di centosessant'anni dalla pubblicazione del libro di Charles Darwin sull'origine delle specie, con tutte le evidenze analitiche e sperimentali accumulatesi a suo favore, sono davvero troppi per parlare ancora di *teoria*: l'evoluzione è un *fatto* assodato. Nell'accezione comune una teoria è una supposizione sul funzionamento di un fenomeno che deve essere validata; quando la teoria viene validata cessa di essere tale e diventa una *conoscenza*. L'evoluzione biologica per selezione naturale è un *fatto* del quale ora siamo a conoscenza. Probabilmente si aggiungeranno dettagli e conoscenze sempre più approfonditi, ma l'impianto di questa conoscenza è ormai consolidato, ed il suo insegnamento dovrebbe essere introdotto fin dalle scuole elementari al pari dell'eliocentrismo del sistema solare, che nessuno si sogna di definire teoria e tantomeno confutare (a parte i terrapiattisti!). Il genere umano ha usato inconsapevolmente per oltre diecimila anni la selezione artificiale, basata sugli stessi criteri di quella naturale, per produrre vegetali e animali con le caratteristiche più utili per sé stesso. Non ci meravigliamo che dal lupo siano stati prodotti alani e chihuahua; tuttavia vi è ancora chi non vuole accettare che scimpanzé ed umani abbiano un antenato comune e siano geneticamente molto vicini.

Chiudiamo l'argomento dubbi sull'evoluzione precisando che qualunque dialogo fra scienza e religione, in questo come in altri contesti, è privo di senso. Scienza e religione nascono entrambe dalla curiosità e dall'esigenza di spiegazioni, tipicamente nella mente umana (ricerca di nessi causali, vedi avanti); ma le loro posizioni sono inconciliabili. La scienza procede per verifiche, tentativi ed errori, talvolta con notevole fatica, ed è costantemente messa in discussione, è provvisoria per definizione. Le religioni invece rifuggono la verifica, sono dogmatiche, sostanzialmente immutabili, e costituiscono una comoda ed efficiente scorciatoia ansiolitica, seppur non priva di effetti collaterali anche gravi! Chi sceglie queste non cerchi di confrontarle con l'altra. Sconsigliamo la lettura di queste pagine a chi abbia una ferma convinzione religiosa: prima di tutto perché sappiamo che non cambieremmo le sue credenze, e poi perché non ci arroghiamo il diritto di tentare di cambiarle. Confidiamo che chi invece è curioso ed aperto a innovazioni possa trovare questa lettura interessante.

2. RIASSUNTO

L'evoluzione darwiniana delle specie è un F*atto* accertato come l'eliocentrismo del sistema solare, non una *Teoria*. I meccanismi evoluzionistici operano su qualunque struttura replicante, inorganica e organica, e nella loro essenzialità (replicazione imperfetta e selezione naturale differenziale, con tutte le conseguenze retroattive che si manifestano) sono talmente potenti da spiegare l'esistenza di tutto ciò che è presente nell'universo conosciuto, dal livello molecolare agli organismi viventi ed anche a quelli pensanti. Nei meccanismi evolutivi biologici lo stato presente dell'ambiente, con le specie in esso viventi e il loro comportamento, *dirige* automaticamente i processi evolutivi futuri. Questi processi sono autocatalitici (si sostengono da sé) e fortemente retroattivi (influenzano e modificano le cause che li producono), e questo spiega l'aumento esponenziale della complessità delle specie, chiaramente visibile nel corso di milioni di anni, senza la necessità di alcun *progetto*.

Come la forma corporea, anche il comportamento ed i processi cognitivi sono prodotti evolutivi. Il sistema nervoso evolve parallelamente all'aumento delle capacità d'interazione e modificazione dell'ambiente da parte delle specie. Il sistema si organizza in modo gerarchico, nel senso che le nuove strutture neuronali che compaiono lungo l'evoluzione non sostituiscono le più antiche, ma vi si sovrappongono, le utilizzano, le modificano e le modulano. In questo libro viene presentata un'innovativa ipotesi dell'organizzazione del sistema nervoso che rende possibile la comprensione di molti aspetti funzionali classicamente considerati insondabili.

Il sistema nervoso si è evoluto perché l'organismo possa agire efficacemente nell'ambiente in cui vive. Percepire le caratteristiche dell'ambiente potenzialmente utili o pericolose, a contatto o a distanza, consente azioni finalistiche utili alla sopravvivenza e alla riproduzione. In estrema sintesi, una rete di cellule particolari (neuroni), tra loro comunicanti rapidamente, codifica le informazioni (afferenze) provenienti da apparati sensoriali e le trasforma in codifiche per azioni muscolo-scheletriche e secretorie. Queste codifiche consistono in una combinazione di neuroni attivi e inattivi come le caselle bianche e nere di un codice quadrato QR (analogo al codice a barre dei prodotti del supermercato). Si può immaginare che ogni diversa distribuzione di caselle bianche e nere costituisca una specifica *rappresentazione* di ogni diversa afferenza sensoriale o attivazione motoria e dei passaggi intermedi che trasformano la prima nella seconda.

La rete neuronale di organismi evoluti è attivata costantemente da una moltitudine di afferenze esterne ed interne. Per agire efficacemente nell'ambiente è necessario che il sistema selezioni le afferenze utili rispetto a quelle meno utili al compito: deve effettuare un *filtraggio*. Le strutture sensoriali periferiche (retina, cute, etc.) prima, successivamente quelle midollari, e poi quelle encefaliche profonde (paleoencefalo), effettuano automaticamente e inconsapevolmente questo filtraggio con caratteristiche sempre più sofisticate di livello in livello. Un riflesso utilizza un filtraggio automatico sulle

afferenze che lo scatenano; ma quando questo filtraggio è operato da strutture corticali, in particolare quelle prefrontali, può divenire volontario e cosciente, ed è quello che correntemente viene definito *attenzione.*

Il *ricordo* e l'*immaginazione* sono il prodotto evolutivo cruciale per lo sviluppo della *mente*. Sono proprietà emergenti dei sistemi nervosi più evoluti che costruiscono rappresentazioni sensoriali non solo correlate alle afferenze sensoriali *contestuali* (attuali e reali), ma anche su memorie (ricordi) di sensorialità pregresse, rappresentazioni di oggetti ed eventi del passato o di sensorialità future previste. Queste proprietà consentono comportamenti intenzionali immaginando azioni e risultati (previsione) così da poter effettuare modifiche operative prima di percepire le conseguenze reali dell'azione. Le strutture neuronali prefrontali sono dedicate a questo e implicitamente operano una distinzione tra percezione contestuale e percezione immaginata, poiché senza questa distinzione l'interazione volontaria utile con l'ambiente è impossibile.

Coscienza è un termine quanto mai evanescente. La letteratura offre un ampio ventaglio di definizioni, che vanno da elencazioni delle sue caratteristiche, alla sua localizzazione in certe aree cerebrali, fino alla negazione della sua esistenza. Pensiamo riduttivamente che *coscienza* sia la parola con cui indichiamo la *sensazione* (il termine più corretto è *sentimento*, (vedi nel cap. 5 definizioni) provocata dal funzionamento di alcune strutture corticali cerebrali che rappresentano gli *effetti sulla propria persona* di percezioni contestuali o immaginate. Questo consente di agire intenzionalmente prevedendone i risultati. Descriveremo meglio nel cap. 6 "Consapevolezza".

Questa non è una funzione localizzabile nel cervello, si manifesta nel comportamento, *nell'interazione con l'ambiente*. La sensazione che ne ricaviamo può essere definita un *settimo* senso: "***sento** di vedere, di udire, di agire*, *di immaginare, di soffrire*". Per la maggior parte del nostro tempo questa proprietà opera sullo sfondo, ed emerge in primo piano solo quando rivolgiamo effettivamente l'attenzione a questi effetti piuttosto che all'azione o all'ambiente. La distinzione tra percezione contestuale e immaginazione è indispensabile per agire utilmente nell'ambiente, e può essere implicita o consapevole. Ad esempio, quando apro il frigorifero per prendere una Coca-Cola che so (ricordo) essere al suo interno, la mia attenzione è rivolta al desiderio della Coca-Cola piuttosto che al fatto che la Coca-Cola non è effettivamente presente nella mia percezione attuale (distinzione implicita). Se, aperto il frigorifero, trovo un'aranciata anziché la Coca-Cola, divento consapevole della differenza fra la percezione attuale e la mia immaginazione (distinzione consapevole).

La spinta evolutiva per la comparsa ed evoluzione del sistema nervoso è l'utilità dell'apprendimento dei **nessi causali** tra la percezione di eventi (fenomeni ambientali o azioni proprie e altrui) e le conseguenze sensoriali personali.

Le azioni riflesse sono tali perché selezionate da questa pressione, alcune sono ereditate geneticamente (istinti), altre possono essere secondarie ad apprendimento individuale (fenotipico), come nei riflessi condizionati. In quelle ereditate una combinazione di attivazioni e inattivazioni in neuroni connessi ad apparati sensoriali (sensazione) genera automaticamente un'appropriata combinazione di attivazioni e inattivazioni in neuroni connessi ad apparati motori e secretivi (azione utile alla sopravvivenza e

riproduzione). In altri termini, la codifica sensoriale in un gruppo di neuroni produce automaticamente una codifica motoria in un altro gruppo, una *trasformazione sensori-motoria.*

L'apprendimento fenotipico richiede invece una rete neuronale plastica, in grado di modificare le connessioni e quindi le interazioni tra i propri neuroni in funzione delle esperienze individuali (memoria). La configurazione basilare è una rete a **tripletta associativa,** che sarà descritta compiutamente nel corso del libro, costituita da tre popolazioni neuronali che *rappresentano* tre situazioni: uno *stato sensoriale iniziale*, un'*azione*, e lo *stato sensoriale finale* conseguente a quella azione attuata in quello stato sensoriale iniziale. Questa tripletta, che riteniamo nostro contributo originale, è fondamentale per la comprensione dell'azione volontaria e della previsione e mostra l'importanza della retroazione sensoriale ambientale nell'esecuzione di qualunque azione. Questa configurazione neuronale apprende automaticamente e riproduce quale azione effettuare per ottenere un dato stato finale partendo da un dato stato sensoriale iniziale, e quale stato finale si ottiene con una data azione da un dato stato sensoriale iniziale. È un modo automatico di apprendere i *nessi causali* tra i fatti e gli eventi che vengono percepiti e le loro conseguenze che accrescono notevolmente le probabilità di sopravvivenza e riproduzione.

Nella parte centrale del libro vengono descritte, con un nuovo approccio su base connessionista, le funzioni dei vari livelli delle strutture di un sistema nervoso evoluto. Che pensiamo possano aiutare ad avere un quadro generale del suo funzionamento.

Nel nostro precedente libro *Coscienza Artificiale* abbiamo dimostrato che anche i comportamenti cognitivi, al pari di quelli motori, non sono esclusivi dei sistemi biologici, perché sistemi neurali artificiali immersi in ambienti complessi e sottoposti ad evoluzione darwiniana (connessionismo evolutivo) possono svilupparli. Alla fine di questo libro illustriamo sinteticamente queste sperimentazioni effettuate per mezzo di *reti neurali artificiali*, senza entrare nei dettagli tecnici delle simulazioni, per i quali rimandiamo, chi fosse interessato, al primo libro

ARM e POSTURA sono i nostri modelli che apprendono automaticamente il controllo di un'azione finalistica (raggiungimento di un bersaglio da parte di un arto simulato o mantenimento della postura eretta di un modello bidimensionale umano) e confermano il *Principio Ideo-Motorio* dell'azione volontaria formulato da Lotze e James nella seconda metà del 1800. Questo modello consente anche un'interpretazione dei cosiddetti *neuroni specchio* alternativa alle congetture correnti, che sono principalmente orientate a funzioni empatiche prive però di qualsiasi conferma scientifica.

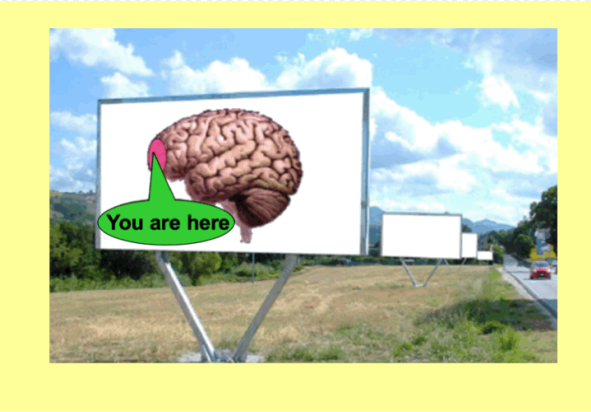
Il modello GAZE (inseguimento visivo di un bersaglio) è stato allestito per verificare la potenza dei meccanismi evolutivi simulati su popolazioni di reti neurali che devono sviluppare un sofisticato sistema di puntamento, analogo a quello dei cannoni di una nave in movimento che deve colpire un bersaglio mobile. Il sistema infallibilmente evolve producendo un sistema efficace che manifesta comportamenti molto simili a quelli umani nel tracciamento visivo.

Questo risultato ci ha consentito d'ipotizzare ed allestire un sistema più evoluto che riesce ad immaginare/prevedere il risultato di azioni future. Abbiamo proposto un'estensione del modello tripletta esecutiva (ARM) con l'aggiunta di un gruppo neuronale direttivo che potesse evolvere in modo

da utilizzare le informazioni della memoria per formulare previsioni necessarie alla gestione del compito. Questo modello rende accessibile lo studio del comportamento intenzionale. ROOMS (una sorta di semplice labirinto) è la nostra simulazione. La constatazione che il sistema *immagina* una condizione sensoriale diversa da quella contestuale che gli consente di risolvere il labirinto (Es: è nella stanza A ma immagina di essere nella stanza B, prima di trovarcisi, per decidere l'azione successiva) ci autorizza ad affermare che prevede il risultato del suo futuro comportamento, un progetto a tutti gli effetti. Il modello conferma che se l'immaginazione dei futuri risultati del proprio comportamento (previsione) costituisce un vantaggio nella sopravvivenza e riproduzione, i meccanismi evolutivi allestiscono progressivamente e invariabilmente strutture neurali in grado di eseguire il compito anche in sistemi artificiali sottoposti a questa pressione evolutiva.

Non andiamo oltre: un riassunto è necessariamente sintetico. Confidiamo che la lettura del libro possa chiarire molte delle domande che speriamo aver suscitato.

3. VOI SIETE QUI



La compulsione a localizzare la sede della coscienza in qualche luogo del corpo è antica come l'uomo. La scorciatoia mistica di risolvere la questione attribuendo la coscienza ad un'anima non corporea ha tranquillizzato molti, ma non tutti. D'altra parte neanche gli attuali strumenti neuroradiologici capaci di visualizzare l'attività cerebrale *in vivo* hanno prodotto risultati consistenti.

Le funzioni cognitive più evolute sono conseguenti all'attività corticale di particolari gruppi di neuroni prefrontali in relazione con l'attività di tutto il resto dell'encefalo. Certamente esistono altre zone corticali che se lesionate impediscono particolari funzioni cognitive, ma non per questo si deve inferire che lì risieda la funzione. Se un televisore non funziona perché un fusibile è rotto, nessuno si sogna di dire che la *funzione* televisiva risiede nel fusibile. Qualunque tentativo di localizzare in una porzione precisa dell'encefalo la sede della consapevolezza è destinato a fallire. Certo esistono zone nevralgiche il cui malfunzionamento impedisce la consapevolezza, e le cortecce prefrontali, come vedremo, appaiono cruciali per questo; ma se il resto delle strutture corticali e profonde non funziona, niente è possibile. Per intenderci, la coscienza è come la musica prodotta da un'orchestra ben coordinata tra direttore e tutti gli orchestrali. Con la frase "voi siete qui", in solo questi più o meno 100 grammi di cortecce prefrontali, intendiamo dire che la rappresentazione consapevole della propria *persona* e delle funzioni d'*immaginazione ricordo e previsione* sono frutto del funzionamento di questa porzione corticale *congiuntamente* con il funzionamento di quasi tutto il resto del sistema nervoso centrale e periferico nell'interagire con l'ambiente ed è nel *comportamento* che si manifesta la consapevolezza.

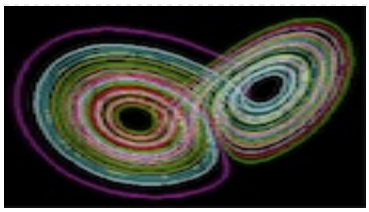
Si può vivere (malamente) senza questa piccola parte di cervello, anche se per buona parte delle nostre azioni sembriamo non utilizzarla, ma la *consapevolezza* della nostra vita è criticamente dipendente dal suo funzionamento. Sono documentate innumerevoli situazioni patologiche nelle quali una lesione delle strutture prefrontali anche bilaterale ha consentito la sopravvivenza, ma con un profondo cambiamento comportamentale improntato all'impulsività e alla superficialità e di fatto caratterizzato dall'impossibilità di prevedere le conseguenze anche immediate delle proprie azioni, ovvero *non consapevolezza*. Ovviamente nessuno può descrivere quale cambiamento soggettivo della vita queste persone avvertano, ma l'osservazione del loro *comportamento* fa pensare che vivano costantemente in modo analogo a quei momenti nei quali una persona sana compie automaticamente azioni anche molto complesse, come guidare un veicolo nel traffico urbano pensando ad altro.

Qualcuno potrebbe meravigliarsi e dire: “ma allora a cosa serve tutto il resto?” (1,5 Kg di encefalo)... Appunto ad agire automaticamente ed efficacemente nel mondo. Le cortecce prefrontali, ultime arrivate nel corso dell’evoluzione, aggiungono altre funzioni, e ci permettono anche di rendercene conto.

Ma come è possibile che una fragile struttura fisica di così piccole dimensioni, se pur costituita da miliardi di inconsapevoli cellule neanche stabilmente collegate, dia origine a capacità così complesse e difficili da descrivere e comprendere? Evidentemente è possibile, ed allora deve essere spiegabile, anche se storicamente l’atteggiamento finora prevalente è stato attribuire la spiegazione a meccanismi sovrannaturali o metafisici (cosa mai voglia dire).

Più recentemente, da un centinaio di anni, si cerca invece di applicare metodologie scientifiche allo studio di queste strutture, dapprima con minuziose descrizioni anatomiche ed istologiche, poi con studi funzionali elettrochimici cellulari, e solo negli ultimissimi anni studi funzionali globali, anche se finora con scarsi risultati. Una delle cause della difficoltà di procedere nella conoscenza di queste strutture è dovuta al fatto che si continuano ad utilizzare metodologie idonee allo studio di sistemi lineari, matematicamente prevedibili, mentre il sistema nervoso nel suo insieme certamente non lo è. Nel corso di questo libro cercheremo di descrivere un approccio differente che ci è parso decisivo per iniziare a comprendere il funzionamento delle attività cognitive e della coscienza stessa. Abbiamo deciso di non appesantire la lettura con frequenti citazioni bibliografiche, che per altro possono tutte essere rintracciate nella bibliografia al termine del libro, ed invece arricchirlo con figure esplicative, alcune delle quali animate.

4. SISTEMI COMPLESSI



Il sistema nervoso, anche quello di specie molto semplici come gli anellidi (i vermi) è una struttura complessa. Complesso non vuol dire complicato, vuol dire che il suo funzionamento non è prevedibile matematicamente per l'alto grado d'interazione e retroazione tra i suoi componenti (in questo caso i neuroni) e con l'ambiente mutevole nel quale il sistema opera. La caratteristica di ogni sistema complesso è quella di essere un sistema *deterministico, ma non prevedibile*.

Per questo il primo punto di riferimento concettuale, indispensabile per affrontare uno studio scientifico della mente, è la scienza che si occupa dei sistemi dinamici complessi, talora evocativamente chiamata *scienza del caos*. Ma non sarà necessario che il lettore entri nei dettagli matematici di questa disciplina, richiameremo solo le implicazioni principali dove serviranno.

Il sistema nervoso, come si è detto, è costituito da un insieme di elementi interagenti le cui proprietà e comportamenti collettivi sono, come si usa dire, *superiori alla somma delle parti*. Tali *proprietà emergenti* nascono da una massiccia interazione e retroazione tra gli elementi costitutivi fondamentali del sistema, le cui singole operazioni individuali possono essere anche relativamente semplici. Questo significa che non si può capire a fondo il funzionamento di un sistema dinamico complesso scomponendolo nei suoi costituenti fondamentali, come si può fare invece per molti dispositivi anche complicati costruiti dall'uomo; il classico riduzionismo scientifico non è qui d'aiuto. D'altro canto mantenersi al livello più alto, quello della psicologia e della filosofia, permette di osservare e descrivere le proprietà emergenti, ma non di capire come queste si formino. La scienza che studia i sistemi complessi ha mostrato che, persino conoscendo ogni singola equazione che governa ogni singolo elemento del sistema, non è prevedibile il suo stato futuro risolvendo quelle equazioni: i sistemi dinamici complessi non sono *integrabili*. Attualmente l'unica metodologia idonea allo studio di questi sistemi appare essere la loro *simulazione*, per osservare come il loro stato cambia nel tempo. Questa consente di comprendere i modi in cui le operazioni elementari si combinano per generare le proprietà emergenti, e in più costituisce un importante banco di verifica di ogni ipotesi. Formulare con questa metodica modelli funzionanti dell'organizzazione sensori-motoria di animali semplici come una lumaca di mare, o modelli di mente (pensiero, immaginazione e coscienza) in specie più complesse, consente finalmente di uscire dal campo delle storie "proprio così" delle ipotesi arbitrarie poco o nulla verificabili, per entrare nell'ambito delle ipotesi verificabili con rigorose metodologie scientifiche.

Esistono dagli anni Ottanta del secolo scorso validi modelli di simulazione dinamica del sistema nervoso. La branca della psicologia cognitiva che ha prodotto e studiato tali modelli è il *connessionismo,* i cui modelli sono oggi diffusamente noti con il nome di *reti neurali artificiali*. Il livello d'indagine del connessionismo è particolarmente idoneo alla ricerca sui sistemi nervosi quali sistemi dinamici complessi e sulle loro proprietà emergenti. Queste, infatti, appaiono differenti a seconda della scala a

cui si osserva il sistema. Alla scala più bassa, quella delle neuroscienze, con il loro approccio cellulare, genetico e molecolare è possibile osservare il comportamento dei singoli elementi (neuroni e loro componenti), ma poco o nulla le proprietà emergenti dalle loro interazioni. Alla scala più alta, quella delle discipline umane: psicologia e sociologia, è possibile osservare il comportamento globale del sistema e alcune delle sue proprietà emergenti, ma non è possibile spiegare *come* tali proprietà emergano, e quindi comprenderle. Per comprenderle occorre situarsi in una scala intermedia e simulare il comportamento di aggregati neurali. È quanto fa il connessionismo. Il connessionismo è quindi il secondo punto di riferimento concettuale di questo libro, e la simulazione tramite reti neurali artificiali è il suo principale strumento metodologico.

Il terzo, imprescindibile punto di riferimento concettuale è poi, come si è detto all'inizio, l'evoluzionismo. Fino ad oggi la ricerca sulle funzioni mentali superiori si è quasi inevitabilmente concentrata sulla coscienza o consapevolezza umana, bene o male l'unica considerata degna di questo nome. Con risultati quanto mai incerti. Al contrario, in questo libro ci proponiamo di considerare ogni funzione mentale (memoria, immaginazione, ragionamento, coscienza) al pari di ogni altra funzione corporea che si è evoluta per aumentare le probabilità di sopravvivenza e riproduzione del portatore. Abbiamo insomma ritenuto insensato chiederci: "cosa è la coscienza?" senza prima chiederci: "a cosa serve?" e: "come e perché si è evoluta?"

Questo ci ha portato a cercare d'identificare le caratteristiche ambientali capaci di indurre la comparsa di una *mente* nelle specie in evoluzione, con una visione che potremmo definire *ecologica*, nel senso che riteniamo possibile **comprendere la mente solo considerandola nell'interazione con l'ambiente in cui è immersa**. Quanto più variabile e complesso è l'ambiente significativo per la specie (e l'ambiente umano appare certamente il più complesso), tanto più vantaggiosa appare la comparsa evolutiva delle funzioni cognitive. Si osserva anche una retroazione tra i meccanismi evolutivi, che producono specie sempre più complesse, e la conseguente pressione ambientale con cui interagiscono, che diventa sempre più selettiva.

Sono disponibili metodologie di simulazione dell'evoluzione. Tali metodologie, che vanno generalmente sotto il nome di *algoritmi genetici* e *vita artificiale*, sono agevolmente adattabili ai modelli connessionistici di sistemi cognitivi a reti neurali artificiali, modelli che possiamo chiamare *menti artificiali*. La sovrapposizione di metodologie evoluzionistiche a quelle connessionistiche, definita c*onnessionismo evolutivo* (Chalmers 1991, Calabretta and Parisi 2005, Yao 1993, 1995, 1999), ha come gradito effetto collaterale quello di minimizzare il principale punto debole della metodologia simulativa. Il metodo simulativo, di fatto, non garantisce di per sé l'attendibilità dei risultati: si pensi a come sia possibile simulare un universo geocentrico senza che questo ne provi l'esistenza.

Il rischio di non corrispondere alla realtà è particolarmente elevato quando i modelli simulati sono costruiti a tavolino in modo da possedere la funzione da studiare: in questo caso infatti i preconcetti e pregiudizi del ricercatore assumono necessariamente un ruolo preponderante nel determinare il funzionamento del modello. Tale rischio perde invece consistenza quando, come nelle nostre simulazioni, le funzioni indagate non sono preconfezionate, ma *compaiono spontaneamente* per evoluzione (un'evoluzione artificiale). Simulare in questo modo l'emergenza e l'evoluzione di facoltà

sensori–motorie e cognitive, identificando e *imponendo soltanto le condizioni ambientali in cui una data facoltà rappresenta un vantaggio adattivo*, è cosa completamente diversa dall'inserire a priori quella facoltà negli individui simulati. Nell'accennato esempio dell'universo geocentrico, una metodologia equivalente consisterebbe nel simulare l'universo dal Big Bang, e osservare se l'universo che si forma è geocentrico oppure no; procedura non a prova di errore, ma corretta.

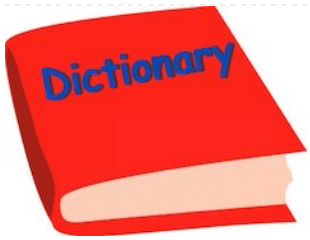
Infine, nella metodologia adottata del connessionismo evolutivo, la selezione degli organismi simulati non viene effettuata sulla presenza o meno della funzione indagata, che sarebbe del resto difficile o impossibile da verificare, ma esclusivamente sulle probabilità di sopravvivenza e riproduzione, che sono modificate dagli *effetti di quella funzione sul comportamento*. Per questo approccio specifico abbiamo coniato la definizione di **comportamentismo artificiale** in quanto pone l'accento sugli *effetti del comportamento* sull'organismo che lo produce piuttosto che sulla presenza o meno delle funzioni stesse. Applicare i principi dell'evoluzione darwiniana alle simulazioni con reti neurali è possibile in quanto negli attuali sistemi informatici la velocità dei processi evolutivi artificiali (il succedersi delle popolazioni, le mutazioni, la selezione degli individui più performanti) è talmente più elevata di quella biologica che si può dire che quello che accade in mille anni nel mondo biologico accade in un secondo in quello elettronico. Nel nostro esperimento GAZE (vedi avanti) lo sviluppo di un sistema di puntamento visivo di un bersaglio mobile si è manifestato dopo circa trenta ore di evoluzione, quando probabilmente sono stati necessari diversi milioni di anni perché si sviluppasse in animali.

Questa metodologia ci permette di verificare che la proprietà più sfuggente e meno definibile della mente, la coscienza, è una proprietà emergente dei sistemi nervosi prodotta dalla loro evoluzione nell'ambiente in cui sono immersi. La studia con un approccio dal basso in senso *filogenetico* del tutto diverso dall'approccio dal basso *molecolare* delle neuroscienze. La mente e la coscienza sono qui considerate proprietà emergenti adattive dei sistemi nervosi evoluti, conseguenze dell'aumento della loro complessità e interazione con un ambiente parimenti complesso. Con questo approccio pensiamo di aver risposto nelle pagine successive, almeno riduttivamente, alle seguenti domande:

1. **come funziona la mente;**
2. **cosa è la coscienza / consapevolezza;**
3. **a cosa serve e perché è comparsa;**
4. **quali sono i suoi correlati neuroanatomici;**
5. **quali sono i metodi attuali più proficui per questi studi.**

Non sosteniamo di aver raggiunto una dimostrazione completa e incontrovertibile, ma abbiamo la presunzione di aver intrapreso una strada proficua e innovativa allo stato delle attuali conoscenze.

5. DEFINIZIONI



Pensiamo sia utile specificare sinteticamente alcuni termini che ricorreranno frequentemente nel testo, alcuni dei quali non hanno univoche interpretazioni nella letteratura specializzata o meno, e che possono anche non coincidere esattamente con questa. Queste definizioni, qui necessariamente riduttive, nel corso del libro saranno descritte più compiutamente e in parte modificate.

Fenotipo: l'insieme di tutte le caratteristiche specifiche di ogni singolo organismo vivente, quindi la sua *morfologia* (il corpo), il suo sviluppo, le sue proprietà biochimiche e fisiologiche comprensive del suo *comportamento* (fenotipo esteso).

Genotipo: la costituzione genetica di un organismo vivente. La sua molecola DNA che costituisce la *ricetta* per la formazione di un individuo di quella particolare specie.

Epigenesi: i cambiamenti dell'espressione del genotipo prodotti dall'ambiente con cui viene in contatto (anche il microambiente del proprio corpo) che definiscono la costituzione di quel singolo fenotipo.

Rappresentazione neuronale: questa è una definizione molto importante, sulla quale si basa gran parte delle spiegazioni successive. È il modo in cui il sistema nervoso codifica gli eventi, oggetti o fatti (esterni: nell'ambiente; o interni: nel corpo) con i quali entra in relazione. Tale codifica consiste in una *combinazione dei livelli di attivazione* (*stati*) dei singoli neuroni di un gruppo più o meno ampio. Questa combinazione è anche detta *configurazione o pattern di attivazione* (brevemente *pattern*)**.** Un analogo noto può essere il codice bidimensionale QR-code, che con la combinazione di caselle bianche e nere può rappresentare moltissime cose (Fig. 1) e che può paragonarsi ad una configurazione di neuroni attivati (bianchi) e inibiti (neri). Con la differenza che mentre nel QR code le caselle bianche e nere mantengono la loro posizione proprio per *rappresentare stabilmente* qualcosa, nell'omologo neuronale proposto lo stato di ogni casella (neurone) è influenzato dallo stato delle caselle ad essa connesse tramite connessioni eccitatorie e inibitorie, con il risultato che la rete nel suo complesso è in uno stato costantemente dinamico (Fig. 2), con condizioni intrinseche che impediscono però il raggiungimento di totale eccitamento o di totale quiete, delle quali si parlerà più avanti nel capitolo 17: *Organizzazione del sistema nervoso. .* La comprensione del funzionamento delle reti neuronali è stata chiarita grazie ai modelli connessionistici di "reti neurali artificiali" dei quali si parlerà sinteticamente nel capitolo 27: *il Connessionismo.*

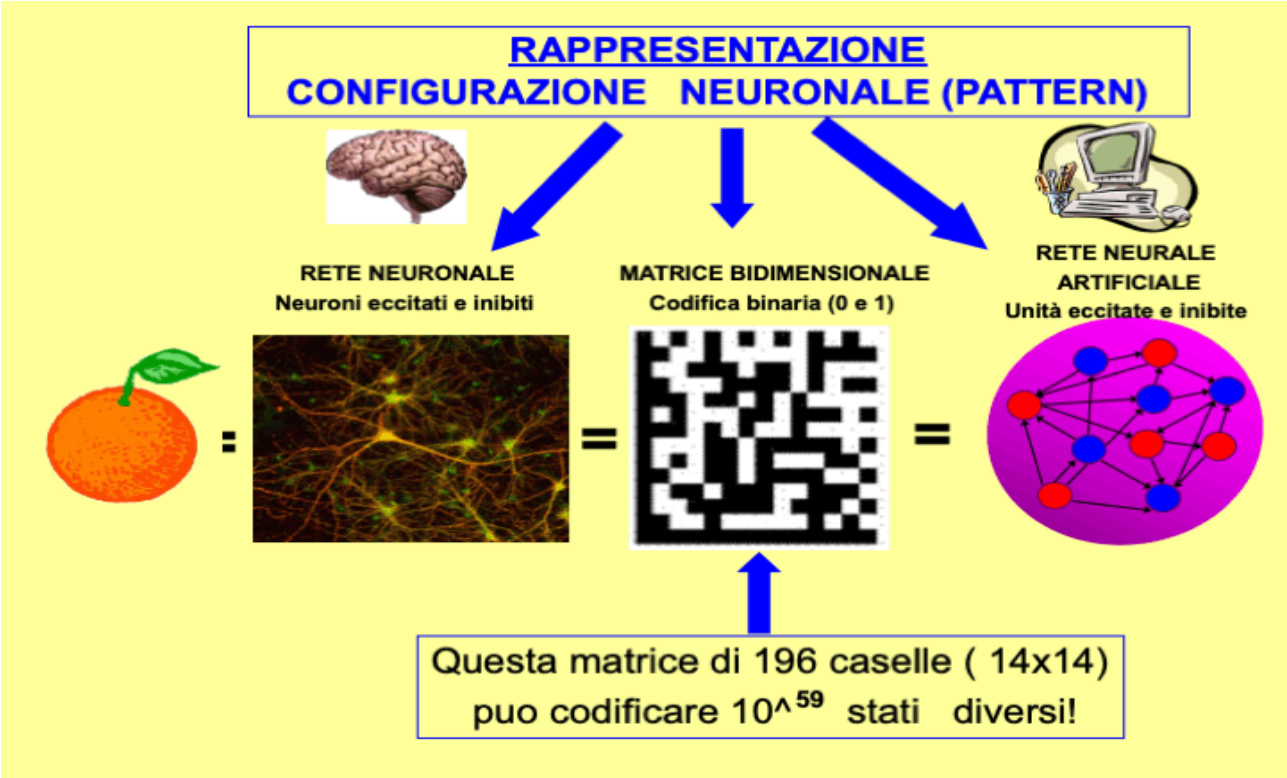


Fig.1. Rappresentazione neuronale.

La rappresentazione neuronale non ha significato di per sé, intrinseco, non costituisce un simbolo come il QR code, il paragone più idoneo sarebbe quello di una pioggia battente sul mare agitato, dove le increspature dell'acqua variano in continuazione e dipendono dalla pioggia (sensorialità in arrivo) e dallo stato in cui si trova la superficie del mare (stato dell'attivazione dinamica della rete neuronale). Il suo significato consiste negli effetti che ha sui neuroni successivi, quelli che ricevono connessioni dai neuroni di questa rappresentazione. Le rappresentazioni che si formano nella corteccia prefrontale codificano *immaginazioni* (vedi avanti); quelle che si svolgono nelle aree di corteccia posteriori alla scissura di Rolando codificano *significati personali di sensorialità* più o meno multimodali; quelle che si svolgono nelle aree di corteccia tra la scissura di Rolando e le aree prefrontali, codificano *sensorialità propriocettive* conseguenti a movimenti che si intende eseguire. Con l'eccezione dell'*immaginazione,* queste rappresentazioni si possono riconoscere anche nelle strutture sottocorticali: sensorialità nel talamo, movimenti nei gangli della base e nel cervelletto. Ancora più in basso (troncoencefalo e midollo) le strutture posteriori codificano sensorialità, e quelle anteriori motricità. Tutti e tre i livelli: corticale, sottocorticale e midollare attuano *trasformazioni* (o *conversioni*) *sensori-motorie*, ossia producono movimenti a partire da sensorialità. Le trasformazioni sensori-motorie midollari costituiscono i riflessi; quelle sottocorticali le azioni e i comportamenti istintivi ed emotivi; quelle corticali le azioni e i comportamenti finalistici e in quelle prefrontali anche volontari (che possono comunque anch'essi divenire automatici-istintivi con la ripetizione). Nel caso di un *semplice* riflesso congenito di evitamento (retrazione di un arto di fronte ad uno stimolo doloroso), la rappresentazione nel gruppo di neuroni coinvolti nella sensorialità dello stimolo doloroso costituisce il codice che viene trasferito al gruppo di

neuroni motori che retrarranno l'arto. Generalizzando: il trasferimento dell'informazione tra diversi gruppi neuronali attivati in sequenza o in parallelo è attuato attraverso rappresentazioni tempo e spazio variabili che circolano in tutta la rete neuronale. La rappresentazione di una immaginazione si può progressivamente trasformare in rappresentazione motoria in altri gruppi di neuroni. Nel testo usiamo la parola *scena*… (paleoencefalica, corticale, etc.) per indicare una rappresentazione neuronale il cui contenuto è una associazione filtrata di altre rappresentazioni sensoriali o di memorie, e le correlazioni tra queste.

Le *rappresentazioni neuronali* possono generare *funzioni* ma queste non sono rappresentate fisicamente con configurazioni neuronali, non sono all'interno del sistema nervoso ma appaiono solo nell'interazione con la realtà dell'ambiente, perché le retroazioni sensoriali provenienti da questo sono parte integrante della funzione. La funzione e la struttura che la genera sono ovviamente cose molto diverse: l'ala di un uccello o di un aeroplano (struttura) produce il volo (funzione) solo quando incontra aria in movimento (ambiente)!

In qualche modo si può dire che con i termini di *simbolo, significato, immaginazione, pensiero, coscienza, etc.* si descrive il *comportamento* di un organismo con sistema nervoso evoluto che non può essere totalmente rappresentato all'interno del cervello.

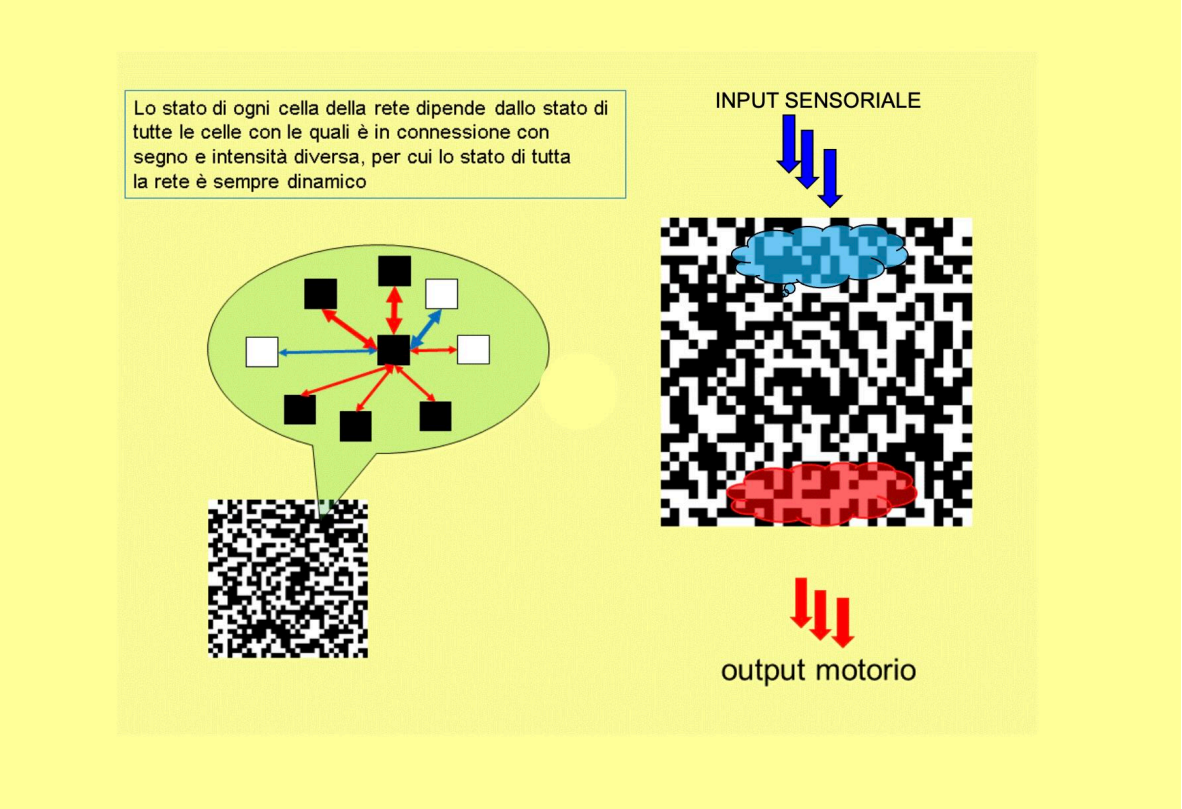


Fig. 2 (animata). A sinistra rappresentazione dinamica con esempio di mutue variazioni tra le celle. A destra esempio di conversione da input sensoriale in output motorio all'interno della rete.

Esplicito: descrivibile simbolicamente (mimico, gestuale, vocale, grafico, linguistico) e pertanto cosciente.

Implicito: utilizzabile / agibile senza descrizione simbolica. Non necessariamente cosciente.

Riflessi: reazione motoria-secretiva automatica a stimoli ambientali.

> *Riflessi genetici* – evolutivamente selezionati nelle singole specie dalla sopravvivenza selettiva e riproduzione.
>
> *Riflessi acquisiti (condizionati)*- appresi individualmente mediante il riconoscimento automatico dei **nessi causali** ("dato questo accade quest'altro") nella sequenza dei fenomeni percepiti che aumentano la sopravvivenza e riproduzione.
>
> *Emozioni*: da e-movere muovere fuori, attivazione neuronale paleoencefalica riflessa multisistemica, evocata da particolari configurazioni di stimoli, che produce: azioni di muscoli somatici (movimento appunto) e di organi interni (cuore, vasi, polmoni, intestino, vescica, ghiandole, ecc.), che si traducono in comportamenti fondamentali innati (freezing, fuga, attacco, accoppiamento ecc.).

Memoria: Sul piano *neurofisiologico* si intende una modificazione delle connessioni sinaptiche di un gruppo di neuroni a seguito di esperienze nel corso della vita, ma non tutte le connessioni neuronali sono plastiche. Quando questi gruppi di neuroni vengono attivati da un evento ambientale esterno o da un evento interno al corpo, il loro insieme riproduce la rappresentazione più simile all'esperienza che ha modificato le loro connessioni (vedi più avanti connessionismo *e* memorie associative) e questo processo di ricostituzione viene definito *rievocazione*. Se questo processo è effettuato da strutture prefrontali la rappresentazione è definita *ricordo.* (vedi più avanti).

Sul piano *psicologico* le Memorie, in un senso più ampio, vengono così distinte comunemente nella letteratura:

> **Memoria implicita**: non simbolica, conserva essenzialmente rappresentazioni di azioni o sequenze di azioni (*saper fare*). Presente anche in molte specie non umane.
>
> **Memoria esplicita** simbolica o dichiarativa, cosciente: *saper descrivere* cosa è o come si fa. Il termine *dichiarativa* deriva dal fatto che la rappresentazione è trasmissibile codificandola con un simbolo (mimico, gestuale, vocale, grafico, linguistico).
>
> **Memoria di lavoro** o **working memory**: mantenimento temporaneo di una rappresentazione sensoriale recente (una percezione appena ricevuta, un'immaginazione appena formata, un'azione-comportamento appena effettuato), in sostanza un *buffer*, non per ricordare, ma per produrre o proseguire un'azione (comporre un numero telefonico) o ulteriori trasformazioni-elaborazioni di quella rappresentazione.

Oltre a queste bisogna aggiungere **la memoria estesa** costituita dalla traccia di tutte le attività umane distribuita nell'ambiente nel corso della storia (manufatti, libri, immagini etc.). Senza l'utilizzo pressoché continuo di questo serbatoio culturale, condiviso e continuamente arricchito, l'uomo non può esistere.

Apprendimento: Processo (automatico o intenzionale) di formazione di memorie attraverso la *modificazione* delle connessioni sinaptiche tra neuroni. Può avvenire con diverse modalità: ripetizione dell'occorrenza di una sequenza sensoriale (riflessi condizionati); con una sola rilevante (spesso pericolosa) esperienza sensoriale tramite il riconoscimento automatico di nessi causali; o per imitazione o percezione di istruzioni simboliche intenzionali.

Attenzione: processo neuronale per cui certe rappresentazioni piuttosto che altre accedono a livelli successivi di elaborazione (analisi sensoriale più approfondita, confronto con altre rappresentazioni memorizzate, riconoscimento categorizzazione, effetti motori); una sorta di filtro che seleziona le rappresentazioni utili al conseguimento di un dato comportamento. Tale attività è generalmente automatica nelle reti neuronali più antiche, ma può diventare intenzionale quando gestita dalle cortecce prefrontali.

Sensazione: questa parola è ambigua in italiano perché ha significati molto diversi come:

1) sensorialità che è la rappresentazione neuronale paleoencefalica e corticale posteriore di una afferenza dai recettori ambientali (exocettori) e dai recettori corporei (endocettori) e che viene utilizzata per innescare riflessi automatici in specie con sistemi nervosi molto semplici (pesci-anfibi) e comportamenti anche intenzionali nelle specie più evolute. Qui useremo prevalentemente questa definizione.
2) sentimento, vedi avanti, la percezione degli effetti su di sé e sull'ambiente di una emozione o una immaginazione, ed è una funzione prodotta nelle cortecce prefrontali ed è connessa con la consapevolezza.

Percezione: è l'effetto dell'attività delle cortecce sensoriali posteriori che *categorizzano e contestualizzano* la sensazione (*cosa, adesso e dove*) È un processo cognitivo delle cortecce sensori-mnesiche posteriori, *prevalentemente automatico*, molto evoluto dell'effetto di un evento o di un oggetto memorizzato sulla base dell'innesco di elementi della sensorialità attuale, con l'assegnazione di un **significato** del tutto personale. Questo raggruppa una serie di attributi che definiscono l'oggetto o l'evento percepito. Nel caso di un oggetto la sua composizione, maneggiabilità, utilizzo etc. e nella specie H. Sapiens anche un simbolo verbale, un nome. Nel caso di un evento, il significato comprende il nesso causale che lo ha generato e le sue conseguenze. Come abbiamo già detto, la *percezione* e il suo *significato* non sono codificati nella rappresentazione neuronale, si manifestano nell'interazione con l'ambiente, nel comportamento osservabile, non sono all'interno del cervello.

Ad esempio nella sequenza di una *tripletta associativa*:

Percezione (*quell'oggetto è una penna)*, il significato è (maneggiabile, leggera …. e *serve per scrivere*) – azione (*prendere la penna*) – retroazione sensoriale (*ho la penna in mano e **scrivo***). Il significato emerge nel comportamento osservabile dello scrivere.

Per avere un'idea della complessità del processo percettivo un esempio: la percezione di una musica in una sala concerto localizza la sensazione provenire dal pianoforte sul palco in una sala affollata, la stessa identica musica in casa viene localizzata come proveniente dalla radio del salotto, e se già esperita in passato anche riconosciuta. Come dire la percezione è una rappresentazione che dipende non solo dalla sensazione del tipo di stimolo (acustico in questo caso). Ma anche dalla sensorialità *globale* del contesto, dalla scena sensoriale attuale e dalle memorie di situazioni simili. Nella specie umana può avere una componente simbolica, spesso di tipo linguistico, un nome. Questo non esclude che altri animali con sviluppo encefalico elevato (primati) possano percepire oggetti o eventi nell'ambiente anche solo con una simbologia mimico-gestuale o vocale non linguistica.

Persona: lo *schema corporeo* (Bonnier, 1905), è una rappresentazione del proprio corpo, non consapevole e localizzata nella corteccia parietale destra, sostanzialmente è una rappresentazione dell'*esterno* del corpo (posizione, forma, stato di attività dei vari distretti muscolari scheletrici e cutanei). Psicologicamente l'*immagine corporea* è invece definita come percezione *consapevole* del proprio schema corporeo in relazione all'ambiente circostante, è una definizione ancora molto dibattuta, non viene definita la sua localizzazione ed è prevalentemente usata nelle descrizioni di patologie neurologiche e psichiatriche. Ma la definizione di *immagine* ci fa pensare che questa sia una rappresentazione neuronale nelle cortecce prefrontali (vedi avanti) e che oltre alla rappresentazione della sensorialità dell'*esterno* del proprio corpo comprenda anche una sintesi del proprio comportamento, costantemente aggiornati dalla contestualità ambientale e dalle esperienze incontrate. Non volendo interferire con la definizione di *immagine corporea* su descritta, proponiamo di definire *persona* la propria *unità somatica e comportamentale* con le proprie esperienze acquisite. Si potrebbe dire che rappresenta *l'interfaccia dinamica* con il mondo **(io, adesso, qui)** che viene sempre implicitamente utilizzata nei processi decisionali coscienti.

Immaginazione: L'immaginazione è la rappresentazione neuronale nelle reti prefrontali di una sensorialità *non contestuale* riconosciuta implicitamente come diversa dalla percezione della realtà contestuale (tranne che nel sogno). È una rappresentazione riduttiva ed essenziale della percezione reale e nella specie umana queste rappresentazioni sono prevalentemente visive (da qui il termine *immaginare*).

Nel caso dell'immaginazione la *tripletta associativa* è una tripletta *virtuale* perché una, due o tutte le tre componenti possono essere immaginate e il nesso causale è identificato nella propria persona che ha innescato il processo "**io adesso** ho fame" (stato iniziale della tripletta) "**io i**mmagino che questa sera mangerò" (azione immaginata), e "**io sarò** sazio" (stato finale della tripletta desiderato/ immaginato).

L'immaginazione si definisce In base al contenuto in:

Ricordo: rappresentazione di sensorialità non attuali esperite in passato;

Previsione: rappresentazioni di probabili proprie sensorialità future immaginate (incluse le conseguenze di una propria azione-comportamento)**;**

Pensiero/Ragionamento: concatenazione di rappresentazioni sensoriali finalisticamente collegate (progetto);

Intenzione: comportamento volontario**:** scelta e attuata dopo averne immaginato le conseguenze sensoriali (ossia averle previste o ricordate, v. sopra).

Sentimento: percezione consapevole degli *effetti sulla propria persona* dei riflessi emozionali o di altre percezioni contestuali rappresentata nelle cortecce prefrontali. Evolutivamente questa sembra la prima manifestazione di consapevolezza di percezioni solo contestuali. Si noti che *sentimento* ha la stessa radice etimologica di *sentire* e *sensazione* e questo genera confusione. In inglese sensation e feeling distinguono meglio le due funzioni. Qualcuno poi utilizza la parola **esperienza** intesa come **sentimento**, ma questa parola ha la stessa radice di *sperimentare,* acquisire una **abilità** (skill) con l'esercizio ripetuto non necessariamente consapevole. Basti pensare all'apprendimento di un riflesso condizionato in un piccione, quindi qui useremo **esperienza** come modalità di apprendimento fenotipico individuale, non necessariamente consapevole, per acquisire abilità in qualcosa.

Consapevolezza: *percezione consapevole***,** *degli effetti sulla propria persona e sull'ambiente di una percezione sia contestuale che immaginata,* "vedo = **sento** di vedere", "penso **= sento** di pensare". Anche questa è una rappresentazione, prodotta nelle cortecce prefrontali. Viene descritta compiutamente nel capitolo successivo.

6. CONSAPEVOLEZZA

sinonimo di coscienza, ma privo di connotati etici/morali

Dal riflesso al pensiero

Abbiamo definito la *percezione* come una attività di riconoscimento e caratterizzazione sensoriale automatica svolta principalmente dalle cortecce posteriori sensoriali e mnesiche che si manifesta con comportamenti di *abilità, intelligenza,* queste caratteristiche funzionali del sistema nervoso sono emerse progressivamente nel corso della sua evoluzione.

Abilità: è la capacità d'interagire con l'ambiente a proprio vantaggio utilizzando la memoria di esperienze passate, memoria genetica di specie e memoria fenotipica individuale (es. riconoscimento ed esplorazione selettiva del proprio territorio). Di fatto è un *comportamento riflesso condizionato.*

Intelligenza: è un termine molto elastico, se si intende la capacità di adattare un comportamento già acquisito a situazioni ambientali simili ma non uguali ad altre già memorizzate, molti animali (i.e. predatori) presentano queste capacità. Se invece si tratta di un nuovo comportamento che richiede la *previsione* (l'immaginazione) delle conseguenze dell'azione allora è un comportamento consapevole effettuato dalle cortecce prefrontali, presente solo in cervelli molto evoluti.

Consapevolezza: valutazione dell'effetto *sulla propria persona e sull'ambiente* di sensorialità contestuali o immaginate. Tutte le definizioni di consapevolezza sottendono il concetto di "consapevolezza di sé" separato dall'ambiente percepito, senza minimamente spiegare come il cervello possa generare questo *sentimento.* Quindi sul piano neurofisiologico si deve partire dal fatto che le reti neuronali cerebrali debbano poter rappresentare oltre alle sensorialità derivate dalla percezione dell'ambiente anche una rappresentazione della propria *persona*. Da circa un secolo si conosce una zona della corteccia posteriore laterale destra che contiene una rappresentazione dello *schema corporeo* che probabilmente viene utilizzata inconsapevolmente per muoversi ed agire correttamente nell'ambiente. Pensiamo allora che le reti neuronali nelle cortecce prefrontali, che sappiamo essere in grado di rappresentare qualunque sensorialità proveniente dalle cortecce sensori-mnesiche posteriori, siano in grado di rappresentare lo *schema corporeo* arricchito di alcune modalità comportamentali acquisite per esperienza individuale (*persona*) e che questa rappresentazione sia costantemente aggiornata e possa essere considerata **l'interfaccia dinamica di sé con l'ambiente.** Pensiamo quindi che l'aggiornamento (il cambiamento) di questa rappresentazione sia valutato come conseguenza dell'interazione con l'ambiente percepito (tripletta associativa vedi in seguito), e sia utilizzato per finalità operative.

Mentre abilità e intelligenza sono *osservabili* dall'esterno e quindi valutabili e misurabili, la consapevolezza ha una componente *privata* insondabile, il *sentimento,* e una componente *pubblica* studiabile con l'osservazione di alcuni aspetti comportamentali. Quello che abbiamo detto per il *significato* vale anche per la *consapevolezza*, non è rappresentata nelle reti neuronali prefrontali, pur essendo una funzione generata da queste, ma si manifesta nel comportamento *interattivo con l'ambiente* nonostante qualcuno si ostini a cercarne la localizzazione precisa all'interno del cervello.

Nella fiorente letteratura in merito le posizioni prevalenti e opposte sono le seguenti:

- Da una parte chi sostiene che ogni semplice reazione finalistica all'ambiente sia già una sorta di cognizione e quindi di coscienza. Di qui anche il comportamento di un insetto che ricerca cibo o costruisce un nido dovrebbe essere cosciente. Questa posizione ci sembra veramente eccessiva perché di questo passo si può arrivare a considerare cosciente qualunque reazione chimica.

- Sul versante opposto molti pensano che non sia possibile consapevolezza senza linguaggio, senza la capacità di descrivere simbolicamente il proprio stato mentale. Anche questa posizione è da rifiutare, perché non suffragata da motivazioni neurologiche consistenti ed in contrasto con il comportamento di molti mammiferi non umani che appaiono davvero consapevoli di alcune loro azioni.

- Alcuni, più sensati, affermano che la consapevolezza è distribuita in modo progressivo nelle specie in evoluzione, in particolare nei mammiferi, senza però riuscire a definirne la motivazione ed il funzionamento.

Nel nostro precedente libro abbiamo mostrato che è possibile simulare e studiare il funzionamento della consapevolezza con mezzi informatici, al pari di altre funzioni neurologiche come gli istinti e i riflessi, confermando di conseguenza che tutte queste funzioni non sono esclusive dei sistemi biologici, ma possibili in sistemi complessi comunque costituiti; e abbiamo mostrato che la comparsa spontanea di queste funzioni è riproducibile su reti neurali artificiali tramite meccanismi informatici simulanti i processi evolutivi darwiniani che descriveremo in modo semplificato più avanti.

Questi esperimenti ci hanno permesso di formulare un'ipotesi consistente sulle motivazioni della comparsa e del funzionamento del sistema cosciente, che adesso speriamo di trasmettervi.

La coscienza come tutte le altre funzioni cognitive emerge spontaneamente e si sviluppa nelle varie specie animali in correlazione con il progressivo aumento di complessità del sistema nervoso e delle sue interazioni con l'ambiente. Anch'essa è un prodotto dei potentissimi e ciechi meccanismi evolutivi darwiniani che automaticamente aumentano la possibilità di sopravvivenza e riproduzione dei viventi.

Nell'universo in ogni istante ogni struttura, dal micro al macrocosmo, esiste grazie a due meccanismi: resilienza e reattività. **La resilienza**, è la capacità di **resistere a forze esterne** senza rompersi o danneggiarsi e dipende dalla natura dei legami atomici e molecolari che costituiscono la struttura e che ne consentono il mantenimento opponendosi all'azione disgregante di forze esterne (collisioni, contatti chimici, pressione, temperatura, radiazioni, ecc.). **La reattività** consiste in **controreazioni attive della**

struttura che tendono a contrastare queste forze esterne. Le strutture che definiamo inorganiche esistono principalmente grazie al primo meccanismo; quelle che definiamo organiche anche grazie al secondo. In sintesi la vita è tale perché è reattiva. Più gli organismi sono complessi, più i meccanismi di reattività sono necessari ed efficaci nel mantenerli in esistenza. Nessuna finalità è prevista: esiste solo quello che resiste e reagisce, il resto semplicemente sparisce o si trasforma.

La comparsa evolutiva del sistema nervoso è congiunta con la **comparsa della mobilità** e della necessità di controllarla sempre meglio. L'evoluzione della sensorialità è motivata dall'utilità di rilevare le discontinuità ambientali ai fini del nutrimento e dell'evitamento di pericoli ai fini conservativi e riproduttivi. Negli animali più evoluti la multisensorialità (vista, udito, olfatto ecc.) migliora la localizzazione delle discontinuità ambientali attraverso un'organizzazione delle strutture neuronali che riesce ad identificare oggetti e fenomeni separandoli da altri o dallo sfondo. Quando nella scena visiva si identificano zone che appaiono collegate tra loro, ma separate dallo sfondo, o che si muovono congiuntamente rispetto a questo, viene individuata una *forma*. Anche una nuvola vista da lontano appare una forma separata dalle altre eventualmente presenti nel cielo. Quando anche solo una parte di questa forma si muove, mantenendo un collegamento anche elastico con il resto e apparentemente senza forze esterne, si attribuisce a tutto il complesso la capacità di movimento. Se un bambino vede la coda di un cane muoversi attribuisce al cane (la forma completa) la capacità di muovere la coda, anche se non ha la minima idea di come questo accada. Insomma un sistema nervoso evoluto ha la capacità innata e del tutto inconsapevole d'isolare forme e attribuire a queste caratteristiche funzionali (significato). Non è certo un compito da poco, ma evidentemente è molto utile per la sopravvivenza. E può essere riassunto nell'apprendimento di **nessi causali***,* il rapporto causa – effetto, nella sequenza di eventi ambientali percepiti. Riconoscere la causa di un dato evento consente di utilizzalo o evitarlo, i riflessi genetici o acquisiti effettuano questo comportamento automaticamente e implicitamente. È un apprendimento non simbolico che estrae la **causalità** dal confronto della *multisensorialità prima* dell'evento e *quella dopo* l'evento, è quindi necessaria una memoria anche inconsapevole. Avviene in un ambiente 4D (spazio/tempo).

Nelle cortecce frontali e forse in quelle sensoriali/mnemoniche posteriori la percezione del tempo è rappresentata inconsapevolmente come **movimento** in funzione della velocità del cambiamento sensoriale contestuale, ma il concetto di "tempo" (consapevolmente distinto in *presente, passato,* e *futuro)* può essere rappresentato solo nelle reti prefrontali che abbiano sviluppato capacità "immaginative" distinguendole dalla percezione della realtà contestuale.

Nei sistemi nervosi i meccanismi evolutivi colgono efficacemente la presenza di relazioni causa-effetto costanti, e producono lo sviluppo di riflessi autoprotettivi, come tali automatici. Anche organismi molto semplici come i batteri possono reagire all'ambiente, con la produzione di sostanze chimiche o modificazioni della propria struttura; ma in questo capitolo intendiamo riferirci ai riflessi o comportamenti manifestati da sistemi nervosi, reti di cellule variamente connesse (neuroni) che trasformano informazioni sensoriali, dall'ambiente e dal corpo, in movimenti e/o secrezioni.

Come abbiamo detto nell'introduzione il funzionamento di una rete di neuroni è stato ben compreso e validato grazie a simulazioni informatiche (reti neurali artificiali) per le loro capacità di

rappresentazione, riconoscimento, classificazione e trasformazione di pattern sensoriali in comportamenti motori e l'argomento viene trattato compiutamente nel capitolo 27 "il connessionismo". Utilizzando questa metodica abbiamo proposto un'ipotesi innovativa dell'organizzazione dei meccanismi reattivi biologici che è stata la colonna portante di tutti i nostri studi sullo sviluppo di modelli artificiali a reti neurali e che ci ha consentito anche una rivisitazione dei processi evolutivi del sistema nervoso che descriviamo in questo libro. L'ipotesi è quella della **tripletta associativa**, che descriviamo compiutamente nel cap. 28 *Learning-by-doing*, e qui anticipiamo molto sinteticamente come meccanismo automatico di apprendimento.

In ambito biologico un riflesso è una trasformazione di una informazione sensoriale in una specifica azione motoria/secretiva adattata al compito. Per poter effettuare questa conversione sono necessari due gruppi di neuroni connessi dal primo al secondo: il primo gruppo *trasforma* lo stimolo, ricevuto da recettori specifici, in una *rappresentazione* neuronale sensoriale; questa nel passare attraverso le connessioni/sinapsi dal primo al secondo gruppo viene convertita in una *rappresentazione* motoria, che compare nei neuroni del secondo gruppo e da questi viene trasmessa agli effettori muscolari o secretori. La risposta a ciascun dato stimolo è determinata dalle connessioni dai neuroni sensoriali a quelli motori, una sorta di memoria operativa sulla base della relazione tra le sensorialità prima e dopo l'azione.

Molti riflessi sono congeniti, innati, geneticamente determinati. L'evoluzione ha progressivamente modellato nelle specie alcune reti neuronali capaci di attuare in modo del tutto automatico riflessi utili alla sopravvivenza dell'individuo (riflessi di evitamento o accostamento, piloerezione, sudorazione, migrazioni, letargo, ecc.) di fronte a eventi ambientali frequenti per la specie. Una particolare categoria di riflessi è costituita dalle **emozioni** (vedi cap. 23 *Emozioni*), reazioni comportamentali multisistemiche a particolari situazioni ambientali (reazioni cardiocircolatorie, muscoloscheletriche, respiratorie, riproduttive, endocrine, esocrine etc.) in parte congenite in parte acquisite. Si potrebbe dire: "personalizzate su una base congenita".

Di fronte ad eventi ambientali invece rari per la specie, ma frequenti e differenti per singoli individui, diventa utile la comparsa di meccanismi neuronali capaci di registrare le esperienze personali ed associarle a comportamenti vantaggiosi. Per questi stimoli e risposte non costanti o non incontrati dalla maggior parte degli individui di una specie, l'evoluzione ha generato, in sistemi nervosi più evoluti, la possibilità di *apprendere* riflessi nel corso della vita dell'individuo. In psicologia sperimentale l'apprendimento di riflessi è chiamato *condizionamento* ed i riflessi appresi sono detti *riflessi condizionati*. L'apprendimento consiste nella modificazione delle connessioni dai neuroni sensoriali a quelli motori/secretori (che sono connessioni plastiche, modificabili) in modo tale che stimoli prima non capaci di evocare un riflesso innato diventino capaci di evocarlo (condizionamento associativo o classico, cani di Pavlov), oppure che una risposta adatta *innovativa* ad uno stimolo venga scoperta e stabilizzata (condizionamento operante, gabbie di Skinner).

Il condizionamento operante è particolarmente importante per comprendere l'apprendimento motorio in quanto implica una complicazione del paradigma neuronale esaminato fino a questo punto. Nei riflessi innati, abbiamo visto, sono coinvolti *due* gruppi di neuroni: il gruppo sensoriale, che codifica lo

stimolo, e il gruppo motorio, che codifica la risposta. I riflessi genetici sono comparsi evolutivamente attraverso la selezione naturale, non è quindi necessario il terzo gruppo della tripletta che codifica lo stato sensoriale dopo l'azione perché la connessione tra la rappresentazione dello stimolo e la rappresentazione dell'azione (anche di una sequenza molto articolata di azioni) è già stabilizzata geneticamente. Nei riflessi appresi fenotipicamente (condizionati) la tripletta associativa è invece completa e funzionante: con una differenza tra condizionamento *associativo* (Pavlov) e *operante* (Skinner) perché nel primo si tratta di includere tra gli stimoli che provocano un riflesso genetico nuove sensorialità contestuali (il suono della campanella alla vista del cibo che da solo provoca la salivazione), ed è il terzo gruppo, la sensorialità successiva all'assunzione del cibo (la sazietà), che produce l'associazione tra i due stimoli (suono e vista) che diventano capaci anche singolarmente di evocare la salivazione. Nel condizionamento operante, invece, il riflesso non è già presente, è necessario che venga appresa l'associazione tra la presenza dello stimolo, l'azione e la conseguente percezione sensoriale dei suoi effetti. Il topo che in presenza di una leva (stimolo) casualmente la preme (risposta/azione) e così ottiene cibo (effetto della risposta) ha le *tre* rappresentazioni neuronali. Se queste vengono memorizzate temporaneamente, la presenza *contemporanea* dei tre elementi: *leva-premere-cibo* permette di modificare le connessioni sinaptiche dai due gruppi sensoriali (leva e cibo) al gruppo motorio (premere la leva) in modo da fissare e rinforzare l'azione. Va notato che la tripletta è necessaria fintantoché l'azione e il suo risultato sono innovativi; con la ripetizione e il progressivo rinforzo, le connessioni dal gruppo sensoriale dello stimolo (presenza della leva) diventano sufficienti a elicitare di per sé l'azione (premere la leva) e la tripletta torna ad essere un riflesso completamente automatico dove la retroazione sensoriale ambientale non è più necessaria per l'apprendimento ma è sempre presente per stabilizzarlo e, nelle specie più evolute, per consentire una certa modulazione dell'azione in base alle variabili condizioni contestuali. Il destino di ogni comportamento utile e innovativo, se ripetutamente confermato, è diventare un comportamento automatico. Prima di allora la *memoria* consente l'apprendimento, che in questi casi procede per prove ed errori, che inevitabilmente espongono l'individuo a potenziali danni fino a che non si sviluppano i riflessi adatti. Un riflesso condizionato non costantemente rinforzato dalla retroazione sensoriale, nel tempo si estingue; bisogna quindi considerarlo *un processo* non uno stato*.* In prima approssimazione il processo di condizionamento sembrerebbe addirittura banale: si tratterebbe di una **semplice!** associazione tra due eventi; ma le cose sono assai più interessanti e chi volesse approfondire potrebbe leggere il libro di Giorgio Vallortigara *Altre Menti* che è illuminante sull'argomento.

In termini più generici la *tripletta* associa tre stati neuronali: *lo stato sensoriale prima dell'azione, l'azione, e lo stato sensoriale dopo l'azione,* che mutano ricorsivamente.

In modo del tutto automatico la tripletta individua e memorizza il nesso causale che trasforma lo stato sensoriale iniziale nello stato sensoriale finale, che in questo caso è l'azione eseguita. Precisiamo, per *azione* si intende percezione della *sensorialità dell'azione,* che può anche essere nulla se non c'è azione, ma al posto di questa ci deve essere almeno la sensorialità di un evento anche esterno al corpo, al quale possa essere attribuita la *causa* del cambiamento dalla situazione iniziale a quella finale, e anche se questa non è la causa vera si può attribuirgliela come accade nel comportamento "superstizioso" (osservabile anche in animali come i piccioni in condizioni sperimentali di apprendimento di riflessi condizionati operanti). E nei cervelli umani, quando manca del tutto questa sensorialità, si può

attribuire la causa del cambiamento ad un "concetto" inventato, il destino o una divinità. Questa necessità di attribuire una causa agli eventi percepiti è conseguenza del comportamento "ricerca" che verrà descritto nel capitolo 23: Emozioni e sentimenti.

La possibilità di connettere in serie e in parallelo diverse triplette associative consente di comprendere il funzionamento di molte funzioni del sistema nervoso, dai riflessi semplici al comportamento cognitivo cosciente. Come vedremo nel cap. 28 *Learning-by-doing*, il sistema a tripletta può anche essere utilizzato rappresentando nei tre gruppi rappresentazioni sensoriali immaginate anziché reali percepite. In questo caso la *tripletta associativa* è una tripletta *virtuale* perché una, due o tutte le tre componenti possono essere immaginate e il nesso causale è identificato nella propria persona che ha innescato il processo "**io adesso** ho fame" (sensorialità iniziale della tripletta) "**io i**mmagino che questa sera mangerò" (azione immaginata), e "**io sarò** sazio" (sensorialità finale della tripletta desiderata/ immaginata).

Come anticipato l'**emozione** è un comportamento riflesso paleoencefalico multisistemico, evocato da eventi esterni contestuali per poterli gestire automaticamente (paura, rabbia, etc). Animali con sviluppo cerebrale adeguato (mammiferi) modulano contestualmente il proprio comportamento emotivo solo sulla base delle esperienze individuali memorizzate (riflessi condizionati) quindi solo sulla base della loro storia passata. Gli animali con cortecce prefrontali più evolute (mammiferi predatori) possono invece modulare il loro comportamento anche in relazione alle condizioni del loro stato psico-fisico attuale. Emerge il **sentimento** che è conseguente ad una attività delle reti neuronali prefrontali che *rappresenta l'effetto* dei riflessi emotivi paleoencefalici sulla propria *persona*, e per questo è una percezione cosciente. Ma in cervelli ancora più evoluti (primati e homo) l'emozione paleoencefalica può anche essere evocata da ricordi o immaginazioni e di conseguenza anche il sentimento può dipendere da queste rievocazioni. Quindi il sentimento non è più solo conseguente ad un fatto esterno e attuale ma può essere evocato da stati sensoriali memorizzati o dalle condizioni di attività attuali dello stesso cervello come percezione cosciente di alcune condizioni metaboliche o neurologiche. Quando poi lo sviluppo cerebrale consente la caratterizzazione della percezione con un simbolismo trasmissibile (gestuale/fonetico/verbale/grafico) il termine *sentimento* viene trasformato in *consapevolezza* che però si allontana un poco dal concetto dell'effetto *su di me.* "**io** *ricordo*= io **sento** di ricordare", "**io** *ho* freddo = io **sento** freddo"

Di fatto l'attività delle reti prefrontali è sempre *immaginativa*, nel senso che è una rappresentazione neuronale sempre successiva di almeno 300-500 ms. alle rappresentazioni corticali sensoriali posteriori contestuali, ciò nonostante, anche a livello prefrontale, continueremo a distinguere tra *immaginazione*, quando questa è ricavata da memorie, e *percezione attuale* quando è conseguenza (quasi immediata) di una percezione corticale posteriore o di una rappresentazione paleoencefalica (emozione). Ripetiamo: la componente privata di questa attività è il **sentimento** e quella pubblica il **comportamento**.

La differenza tra *sensazione* e *sentimento* va precisata meglio: la frase "vedo un albero" può essere tradotta in "ho il *sentimento di vedere* un albero" (Consapevolezza: l'effetto della visione dell'albero su

di me), mentre nell'azione di prendere un oggetto senza pensarci è la *sensazione* di presa (percezione inconsapevole) rappresentata nelle cortecce sensoriali posteriori che pilota il movimento automaticamente. Questo è confermato nella condizione patologica del blind sight (visione cieca) dove accade che si può agire correttamente senza il *sentimento* della visione, senza *sentire* di vedere.

Qualche esempio: (qui inevitabilmente viene utilizzato un simbolismo verbale per definire le rappresentazioni neuronali ma un primate potrebbe comportarsi esattamente così con un simbolismo non verbale).

1) Contatto del ghiaccio in una mano (sensorialità esterna)

Componenti private in sequenza rapida.

Sensazione = Paleoencefalo "*freddo nella mano*"

Percezione = Cortecce posteriori: classificazione e riconoscimento, "*è ghiaccio*" significato "*il ghiaccio è freddo"*

Sentimento = Cortecce prefrontali, consapevolezza, effetto su di me "***sento** il freddo sopportabile del ghiaccio nella mano"*

Componenti pubbliche.

Comportamento = "*metto il ghiaccio nel bicchiere e bevo*"

2) Comparsa di un riflesso emotivo paleoencefalico (sensorialità interna)

Componenti private in sequenza rapida.

Sensazione = Paleoencefalo "*frequenza cardiaca aumentata, sudorazione, piloerezione etc*."

Percezione = Cortecce posteriori classificazione, "*mi batte il cuore, etc.*" riconoscimento (significato) "*pericolo*"

Sentimento = Cortecce prefrontali, consapevolezza, effetto su di me "***ho** paura*" "***sento** paura*"

Componenti pubbliche

Comportamento = "*scappo o attacco*"

La comparsa del sentimento, della *consapevolezza* ormai potremmo dire, è dovuta al vantaggio che questo comporta nella gestione del proprio comportamento perché espande l'apprendimento dei nessi

causali tra la realtà attuale o memorizzata e il proprio stato psico-fisico attuale. “ho fame perché ho mangiato poco ieri, sono stanco perché ho corso troppo, sono ansioso perché devo risolvere un problema” e, In questa situazione, per agire, è indispensabile che venga effettuato il riconoscimento della differenza tra una percezione sensoriale attuale (realtà) rispetto ad una sensorialità immaginata o ricordata.

Giorgio Vallortigara ipotizza che la spinta alla comparsa evolutiva della consapevolezza sia conseguente il fatto che il sistema nervoso “interpreta” differentemente un contatto con oggetti dell’ambiente se questo avviene in conseguenza di un movimento individuale o meno. Questo può dipendere da un meccanismo neuronale (definito “copia efferente”) ipotizzato molti anni fa, e poi confermato, per compensare lo scivolamento dell’immagine retinica durante i rapidi movimenti oculari senza disturbo sulla visione focale. Se questo meccanismo è esteso a tutti i movimenti del corpo, il cambiamento di uno stato sensoriale dovuto ad un evento esterno al corpo (un urto o un contatto) è attribuito a questo evento (causa esterna), ma se il cambiamento sensoriale è dovuto ad un proprio movimento la causa è interna e attribuita alla propria azione e questo condiziona in modo sostanziale il comportamento conseguente.

Questo meccanismo contribuisce alla rappresentazione neuronale del proprio corpo come diverso e separato dall’ambiente ma fa pensare che debba essere presente in quasi tutte le forme di animali (forse anche in un lombrico che si muove nel terreno) ovviamente in modo implicito e inconsapevole. Perché possa emergere la consapevolezza è necessario, come abbiamo detto sopra, che ci sia una percezione degli effetti del proprio comportamento sulla propria persona, e quindi che sia presente in qualche rete neuronale corticale costantemente una rappresentazione attuale del proprio stato psico-fisico (**io, adesso, qui**) che viene confrontata con la propria immaginazione sensoriale futura. Questo confronto avviene inconsapevolmente per la maggior parte del tempo ma può essere elevato ad un livello percettivo cosciente se la situazione richiede una scelta operativa tra altre.

Come descriviamo nel cap.19 “livelli funzionali gerarchici”, mentre le cortecce sensoriali posteriori producono il *significato inconsapevole* dell’interazione della sensorialità ambientale con il proprio corpo, e mantengono congenitamente la loro specificità topografica sensoriale sulla corteccia (corteccia visiva, corteccia uditiva, corteccia somatica). Le reti prefrontali hanno invece la peculiarità di poter rappresentare *l’effetto* dell’interazione di *qualunque tipo di sensorialità*, contestuale, memorizzata o immaginata, *sulla propria persona*, in una successione temporale discretizzata e continuativa. Ciò che è costante nelle cortecce prefrontali è la **rappresentazione dell’effetto** dell’interazione (qualunque sia) **sulla propria persona.**

Il **sentimento** qualifica l’effetto dell’attivazione emotiva come **positivo/negativo** (piacere/dispiacere) su sé stessi,” **io sento paura”** (negativo) o “**io mi sento sazio**” (positivo).

Si può sintetizzare dicendo che le reti neuronali prefrontali riassumono con una valutazione soggettiva di positività/negatività, con varie sfumature, il risultato della propria interazione con l’ambiente, e nell’uomo anche con un’interazione … immaginata! E si può facilmente capire quale vantaggio sulla sopravvivenza/ riproduzione questa funzione rappresenti

Se la sequenza della tripletta (stato sensoriale iniziale-azione-stato sensoriale finale) è contestuale la consapevolezza è sullo sfondo e fornisce l'informazione implicita che la *mia persona sta interagendo* con la realtà ambientale "vedo un albero". Se invece lo stato sensoriale contestuale non coincide con il contenuto della rappresentazione prefrontale (immaginazione), la consapevolezza fornisce l'informazione che la *mia persona è la causa* dell'immaginazione "immagino un albero".

Il fatto che il *confronto* tra la sensorialità contestuale e il contenuto delle rappresentazioni prefrontali sia *assolutamente necessario per un comportamento consapevole* è dimostrato anche dal fatto che nel sogno, quando i lobi prefrontali sono meno attivi, non è possibile distinguere tra realtà e immaginazione e si percepisca l'immaginazione come realtà, e non è un caso che l'azione sia bloccata.

La consapevolezza comunque è quasi sempre frammentaria e dinamica e passa da una condizione di sfondo ad una di piena consapevolezza quando si deve scegliere un azione/comportamento tra altri prevedendone il risultato.

Anche **c**omportamenti molto sofisticati come la guida di veicoli, una volta appresi, possono essere effettuati automaticamente senza piena consapevolezza pensando ad altro. In questi casi la distinzione fra immaginazione e realtà resta evidentemente implicita. Buona parte del nostro comportamento quotidiano si svolge tra automatismo e consapevolezza e questa emerge pienamente solo quando è necessario *operare una scelta volontaria* fra azioni possibili immaginate, sulla base delle loro conseguenze anch'esse immaginate. Insomma la consapevolezza emerge come utile strategia operativa protettiva in mancanza di comportamenti riflessi precostituiti. Con queste capacità l'apprendimento reale per prove ed errori può diventare totalmente virtuale: l'immaginazione di tutte le tre fasi di un riflesso condizionato (condizione iniziale, azione e risultato) permette di modificare il comportamento prima di effettuarlo ed evitare così i rischi reali. È sempre la ricerca di nessi causali la pressione evolutiva che ha prodotto il comportamento consapevole, in questo caso la percezione sensoriale o l'immaginazione come causa dell'effetto sulla propria persona.

L'immaginazione è dunque il presupposto necessario per un comportamento cosciente, e si fa un po' fatica ad accettare che tutto questo serva soprattutto a costruire comportamenti riflessi che una volta collaudati e ripetuti si comportano esattamente come riflessi condizionati automatici.

Più sinteticamente possiamo dire che la *coscienza* sta alle, immaginazioni e ricordi come i *sentimenti* stanno alle emozioni. Come il *sentimento* è la percezione consapevole e contestuale degli effetti su di sé di un'emozione (ho paura), la *coscienza* è la percezione, anche non contestuale, degli *effetti su di sé* di una sensazione, di un'immaginazione, di un ricordo, o di un progetto (sento una musica, immagino un pesce parlante, mi ricordo di un amico, andrò al cinema domani).

La componente *privata* della consapevolezza è quindi il correlato sensoriale soggettivo **(sentimento**) del funzionamento di un sistema neuronale, localizzato nelle *aree corticali prefrontali connesse con tutte le altre strutture encefaliche*, che, interagendo con l'ambiente e ricavandone l'effetto, positivo/negativo, sulla propria persona cerca di produrre comportamenti adatti (componente pubblica) anche in situazioni per le quali le reti neuronali sottostanti, evolutivamente più antiche, non dispongono di risposte riflesse preconfezionate. Tali situazioni sono tipicamente quelle nuove per la

specie e l'individuo, e la probabilità d'incontrare e riconoscere situazioni nuove è correlata al grado di complessità dell'ambiente e del sistema nervoso che lo percepisce. Quando già la sola presenza di propri simili con i loro comportamenti aumenta a dismisura tale complessità, come avviene per la specie umana, non stupisce che l'evoluzione abbia costruito un macchinario neuronale volto a produrre risposte adatte anche di fronte a situazioni nuove mai sperimentate con il minimo rischio possibile.

La componente *pubblica* della consapevolezza è osservabile e quindi studiabile con strumenti ben noti. La componente *privata* invece pone dei grandi problemi interpretativi in quanto non osservabile e tantomeno misurabile, ma possiamo tentare qualche ipotesi:

Gli studi sulla *frequenza critica di fusione percettiva* (FCF) indicano che la discriminazione cosciente di brevissimi stimoli sensoriali (visivi, acustici e tattili), in una sequenza continua, è limitata intorno a pochi **S**timoli **P**er **S**econdo, al di sotto dei 30 SPS. Tra questa soglia e i 50 -60 SPS i singoli impulsi sono "fusi" in una sensazione di "vibrazione" (luminosa, acustica o tremore cutaneo). Al di sopra di questa soglia la sequenza di stimoli appare continua (luce stabile, suono stabile a varie frequenze, contatto cutaneo stabile.). Questi dati fanno pensare che la frequenza di cambiamento nella rappresentazione sensoriale delle reti prefrontali non possa superare indicativamente i 10-20 Hz (ogni 100 - 50 millisecondi), e questo potrebbe indicare che la componente *privata* della consapevolezza emerga quando il confronto di due rappresentazioni neuronali in rapida sequenza mostrino un cambiamento (stimolo, non stimolo, stimolo…). Una rete neurale artificiale opportunamente assemblata esegue facilmente questo compito. Abbiamo supposto che le reti prefrontali rappresentino lo "stato attuale" della *persona* assieme alla situazione sensoriale contestuale e lo aggiornino continuamente forse proprio con frequenze del tipo descritto. Si potrebbe dire allora che la componente *privata* della consapevolezza è un "allarme" sui cambiamenti contestuali del proprio "stato". I cambiamenti possono essere dovuti a stimoli esterni dall'ambiente (vedo, odo etc.) o dall' interno (ho paura: frequenza cardiaca, piloerezione etc.) ma anche dalla memoria (ora immagino una mela). Certo questa non è una spiegazione ma ci sono considerazioni che possono avvalorarla.

In condizioni sperimentali di "parziale" deprivazione sensoriale lo stato consapevole degrada notevolmente. la deprivazione sensoriale completa non è possibile perché la sensorialità endogena continua a funzionare.

Nel sonno come abbiamo detto probabilmente manca gran parte dell'informazione sensoriale ambientale e la corteccia prefrontale utilizza quasi solo memorie e si ha il sogno e non la consapevolezza.

In condizione di veglia la coscienza è costantemente presente anche se con valenza variabile, ed è un processo unico e dinamico perché il suo contenuto (l'immaginazione/ pensiero) cambia continuamente, percependo la realtà o immaginando o ricordando qualcosa. L'apparente contemporaneità di pensieri diversi consegue ad una rapida successione di contenuti diversi. Anche la contemporaneità tra pensiero e azione è apparente, perché la coscienza riguarda *l'intenzione dell'azione* (immaginandola), non la sua esecuzione muscolare, che è pilotata da altre strutture corticali e sottocorticali indipendentemente dalle aree prefrontali. Una volta che l'azione è automatizzata le strutture prefrontali possono mantenere la consapevolezza su pensieri del tutto indipendenti dall'azione, come avviene durante la guida esperta di autoveicoli (penso al lavoro che farò domani *mentre* guido perfettamente nel traffico senza accorgermene). Se l'azione richiede invece un preciso controllo in linea, come infilare il filo nell'ago, c'è una rapidissima alternanza tra la *percezione* della posizione dell'ago e del filo e l'*intenzione* di pilotare la posizione della mano, che nell'insieme appare come consapevolezza dell'azione anche se la sua *esecuzione motoria* non è consapevole.

Il meccanismo dell'attività delle cortecce prefrontali che proponiamo pertanto è il seguente:

In queste cortecce è rappresentato il confronto tra due stati immediatamente consecutivi della propria *persona* e di parte dello stato sensoriale contestuale o memorizzato. Dal confronto automatico di questi due stati emerge la componente *privata* della consapevolezza come" allarme" del cambiamento e valutazione dell'effetto su di sé (sentimento).

- Quando alle aree prefrontali arrivano rappresentazioni dalle aree sensoriali posteriori indotte da stimoli sensoriali attuali, abbiamo una *percezione cosciente* della realtà "io **vedo** un albero laggiù". La causa è l'azione (lo sguardo), l'effetto su di me è la visione dell'albero.

- Quando alle aree prefrontali arrivano rappresentazioni dalle aree mnesiche, indotte-evocate da queste stesse reti, abbiamo *un'immaginazione sensoriale cosciente* "io **immagino** una mela" la mia persona (causa) produce la rappresentazione (l'immagine) di una mela che ricordo ma non vedo (effetto su di me).

- Quando nelle aree prefrontali c'è una rappresentazione sensoriale di un'azione intenzionale (intenzione cosciente, v. cap. 28 *Learning-by-doing*) le *aree prerolandiche* rappresentano il risultato sensoriale desiderato dell'azione. Non "prendo la mela "ma "voglio **sentire** la mia mano che prende la mela.

Quanto detto può essere riassunto nelle seguenti affermazioni che costituiscono gli aspetti peculiari del nostro lavoro:

- La *consapevolezza* può manifestarsi evolutivamente nel comportamento di sistemi complessi naturali o artificiali (vedi seconda parte, esperimenti con reti neurali) interagenti con un ambiente parimenti complesso, non gestibile automaticamente tramite riflessi (innati o appresi), ma tramite la memoria di situazioni simili e l'immaginazione delle proprie sensorialità future (previsione). Nell'uomo è conseguenza dell'attività delle reti prefrontali per effettuare scelte operative con la distinzione implicita tra percezione e immaginazione, senza la quale nessuna azione volontaria è

possibile. E la spinta evolutiva per questa funzione delle cortecce prefrontali è l'estensione dell'apprendimento dei **nessi causali tra la realtà percepita o ricordata e gli effetti sulla propria persona, per ottimizzare il proprio comportamento contestuale e futuro.**

- Il *sentimento* di un'emozione, prodotto dalle reti prefrontali, può rappresentare evolutivamente la prima manifestazione *privata* di consapevolezza dell'effetto, positivo/negativo, sulla propria persona della *percezione sensoriale contestuale.* La componente *pubblica* si manifesta con la produzione di un comportamento simbolico mimico, gestuale, fonetico che trasmette il sentimento provato. Negli umani il simbolismo linguistico amplifica enormemente questa modalità comunicativa.

- Il passo evolutivo successivo, *l'immaginazione*, è la capacità di rappresentare volontariamente in queste strutture la memoria di sensorialità *non contestuali* riconosciute come tali.

- *La consapevolezza*: estende l'ambito del sentimento al proprio passato e futuro perché l'immaginazione sostituisce la contestualità sensoriale.

- La *previsione* (immaginazione delle eventuali proprie future azioni e del conseguente proprio stato sensoriale futuro) costituisce un notevole vantaggio per la sopravvivenza / riproduzione, e di conseguenza per la conservazione della specie.

La possibilità di simulare con metodologie informatiche (*connessionismo evolutivo*) l'emergenza spontanea dei processi cognitivi biologici in sistemi artificiali consente di effettuare studi sulla mente umana scientificamente validabili.

7. VERIFICA DI CONSAPEVOLEZZA

Teoria della mente: questa è una denominazione fuorviante secondo noi, anche se ormai entrata tra i termini correnti, che intende la capacità d'intuire o comprendere gli stati mentali altrui (perché chiamarla teoria allora?), in particolare la capacità di riconoscere in altri individui la consapevolezza.

Qualcuno potrebbe pensare che le tecniche di neuroimmagini cerebrali possano essere d'aiuto. Certo in cervelli evoluti (primati e Homo Sapiens) l'attivazione delle aree prefrontali può essere osservata durante un comportamento pensato; ma con ciò? Sappiamo già che questi cervelli immaginano e pensano, ma su un cervello di coniglio o di piccione cosa ci dicono? Per ora davvero nulla, ed anche in questi cervelli più semplici talvolta sorge il sospetto ci sia un barlume d'immaginazione, visti i loro articolati comportamenti. L'argomento rimane aperto con la certezza che esiste un continuum difficilmente esplorabile tra riflessi e azioni volontarie e coscienti.

Siamo tutti ben disposti ad attribuire comportamenti consapevoli sulla base di similitudini morfologiche con l'organismo che li esprime (altri umani, mammiferi antropomorfi) o sulla base di similitudini comportamentali con noi stessi (quando vediamo un gatto che strategicamente caccia un topo), ma ci arrestiamo di fronte alla possibilità di attribuire consapevolezza ad una medusa o peggio ad un sistema non biologico. In modo molto ingenuo e antropocentrico possiamo attribuire consapevolezza ad un organismo a patto che abbia una *faccia*, e questo fatto la dice lunga sulla costante attenzione che abbiamo nei confronti della comunicazione mimica come informatrice simbolica dello stato mentale altrui. Questa propensione è tanto forte da indurre anche molti costruttori di robot a dotare di espressioni mimiche le proprie creature sperando ingenuamente che un sistema artificiale, solo per il fatto di avere una faccia, sia consapevole di averla. Non c'è da stupirsi molto: i bambini colloquiano regolarmente con i loro pupazzi.

Nella prima metà del secolo scorso Turing ha proposto un test, che prende il suo nome ed ancora oggi da molti è considerato valido per stabilire se un sistema artificiale sia consapevole. Purtroppo esso si basa esclusivamente sulla comunicazione linguistica, e non valuta affatto la consapevolezza del sistema, ma solo la credulità umana. Una versione attuale è rappresentata dagli assistenti vocali presenti sugli attuali smart phone (Siri, Alexa e Google). Gli adulti oltre ad utilizzarli utilmente per trovare argomenti o spiegazioni in rete, si divertono a porre domande più o meno difficili, ambigue o imbarazzanti e sorridono delle risposte, perché per ora la maggior parte degli adulti sa di parlare con una *macchina*

inconsapevole, ma i bambini di 8, 10 anni, che utilizzano a tempo pieno questi dispositivi, cosa pensano? il cellulare può essere molto rapido e preciso nelle risposte, allora è meglio di papà e mamma, è più intelligente? Forse sì, e sicuramente lo diventerà sempre di più e rapidamente a giudicare dai continui progressi nei sistemi di Intelligenza Artificiale. Già oggi i migliori giocatori di scacchi e carte al mondo sono macchine, ma a noi interessa la consapevolezza, e intelligenza e consapevolezza non sono sinonimi. L'intelligenza è la capacità di *risolvere* nuovi problemi; la consapevolezza è *sentire* di risolverli.

Altri hanno effettuato esperimenti di tipo linguistico su animali (insegnando gesti simbolici a scimmie antropomorfe, o suoni simbolici a delfini o pappagalli) o visivo-comportamentale (ponendo una scimmia antropomorfa di fronte a uno specchio dopo averle posto a sua insaputa una macchia sulla fronte e osservando che essa scopriva e rimuoveva la macchia). Purtroppo neanche esperimenti di questo tipo assicurano la presenza di coscienza. Gli esperimenti linguistici non assicurano che i gesti e i suoni siano effettivamente compresi nel loro significato simbolico, piuttosto che appresi e utilizzati meccanicamente di fronte a certi pattern di stimoli. L'esperimento dello specchio può al massimo indicare che la scimmia ha consapevolezza del suo corpo, il che purtroppo è diverso dalla consapevolezza della propria *persona* che costituisce coscienza (anzi addirittura autocoscienza). Di fronte a un animale che "parla" con gesti o simboli fisici o addirittura con parole come i pappagalli, o che allo specchio si comporta come un umano, viene da pensare che sia cosciente come un umano; ma questa è solo una supposizione, non provata.

Riprendendo quanto abbiamo scritto nel capitolo *consapevolezza* pensiamo sia possibile indagare solo sul *comportamento consapevole* orientato alla percezione dell'ambiente, non su quello orientato alla propria *persona (*autoconsapevolezza). Perciò crediamo che sia più utile cercare d'individuare tracce di consapevolezza esclusivamente dalle *caratteristiche comportamentali osservabili* della specie o del sistema in studio, senza porre domande. Ci siamo posti quindi il problema d'individuare quali siano le componenti fondamentali del comportamento che indichino con *certezza* la presenza di consapevolezza. Il sistema deve manifestare un *comportamento innovativo*, almeno parzialmente tale, che presupponga *l'immaginazione esplicita* delle conseguenze della sua azione. Immaginazione esplicita significa che la distinzione tra la situazione sensoriale attuale e quella immaginata non è automatica, come quasi sempre avviene, ma sia il risultato di *attenzione volontaria* a quanto immaginato.

Pensiamo di aver individuato almeno questi tre esempi osservabili dove il termine **innovativo** è fondamentale perché molti comportamenti sequenziali anche molto complessi possono essere automatici e geneticamente ereditari anche negli insetti:

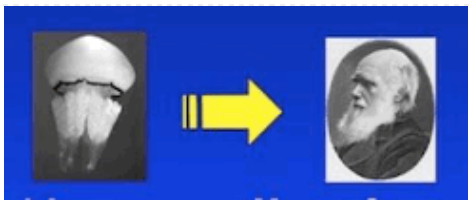
1. **Utilizzo *innovativo* di elementi ambientali occasionali come utensili** (primati e corvidi) Sono descritti molti comportamenti spontanei di questi animali che non lasciano dubbi. Questo presuppone l'immaginazione dell'effetto su di sé di questa utilizzazione.

2. **Costruzione *innovativa* di utensili**: questo comportamento presuppone un progetto quindi l'immaginazione della *sequenza di operazioni* e dei rispettivi risultati su di sé per una finalità operativa. Qualche primate ha dimostrato capacità costruttive di questo tipo.

3. **Comportamento menzognero *innovativo***: l'individuo deve poter ideare e produrre menzogne efficaci e innovative diverse in circostanze diverse. La comunicazione di una falsità presuppone la consapevolezza della differenza tra la realtà e l'immaginazione della falsità, dell'immaginazione del comportamento altrui e dell'immaginazione delle conseguenze su di sé della menzogna.

A proposito del test di Turing questo aspetto potrebbe essere quello determinante per accertare la consapevolezza di un sistema biologico o artificiale. Un po' triste che la miglior prova di consapevolezza sia la menzogna, ma così ci sembra. E non è un caso che *mente* e *mentire* abbiano la stessa radice.

8. EVOLUZIONE



La distribuzione di energia e materia nell'universo conosciuto è disomogenea sia a piccola che a grande scala. Si osserva spesso la formazione spontanea di strutture complesse a partire da strutture più semplici, fatto che sembrerebbe contraddire il secondo principio della termodinamica, che prescrive un progressivo e globale aumento di entropia, di indifferenziazione, in sistemi isolati: quella che è chiamata morte termica.

Ma, prima di tutto, non è stabilito che l'universo sia un sistema isolato. La presupposta esistenza di materia ed energia oscura, che forse rappresenta il 90% di quella totale, dovrebbe ridimensionare la pretesa di aver capito come l'universo sia costituito e come funzioni. Forse è proprio la definizione "sistema isolato" che va rigettata, nessun "sistema" costituito di parti interagenti nello spazio-tempo può essere completamente "isolato". Secondariamente, locali inversioni di tendenza, controbilanciate da più consistenti declini in altre zone, non contraddicono il suddetto secondo principio. Un facile paragone è quello di un corso d'acqua che, scorrendo a valle, dissipa energia potenziale, ma nel cui percorso complessivo si formano, per irregolarità dell'alveo, locali e transitorie inversioni del moto dell'acqua con la formazione di vortici o controcorrenti (strutture complesse emergenti). Di fatto, se l'universo è una struttura dissipativa (Prigogine), la sola presenza di fenomeni retroattivi e non lineari garantisce la continua comparsa e scomparsa di ordine con oscillazione dell'entropia locale.

Nell'interazione tra materia ed energia possono verificarsi cambiamenti nelle forze di coesione tra atomi, tali da produrre nuovi legami molecolari o la rottura di legami preesistenti, e questo rimescolamento può dare origine alla formazione di nuove molecole. La presenza di una certa molecola in un dato ambiente modifica di per sé l'ambiente stesso, ed è possibile che questa modificazione si manifesti con la comparsa di fenomeni autocatalitici che promuovono ulteriori trasformazioni molecolari, in una spirale di azioni e retroazioni difficilmente dipanabile.

Quando tali trasformazioni hanno, come effetto complessivo, la comparsa di copie della molecola iniziale, siamo in presenza di un evento d'importanza critica: è nato un replicante. Di fatto si vengono a costituire automaticamente molecole replicanti di tutti i tipi, semplici e complesse.

Le molecole semplici possono aggregarsi ordinatamente, come nella formazione di cristalli, replicando la struttura cristallina in modo invariante finché le condizioni ambientali (pressione e temperatura) lo consentono. Le molecole grandi, costituite da molti differenti atomi (e quelle costruite con atomi di carbonio, idrogeno, ossigeno e azoto sembrano essere le più grandi), si replicano invece spesso con varianti o errori, e sarà la selezione ambientale a permetterne la conservazione o meno nell'ambiente stesso (Fig. 3).

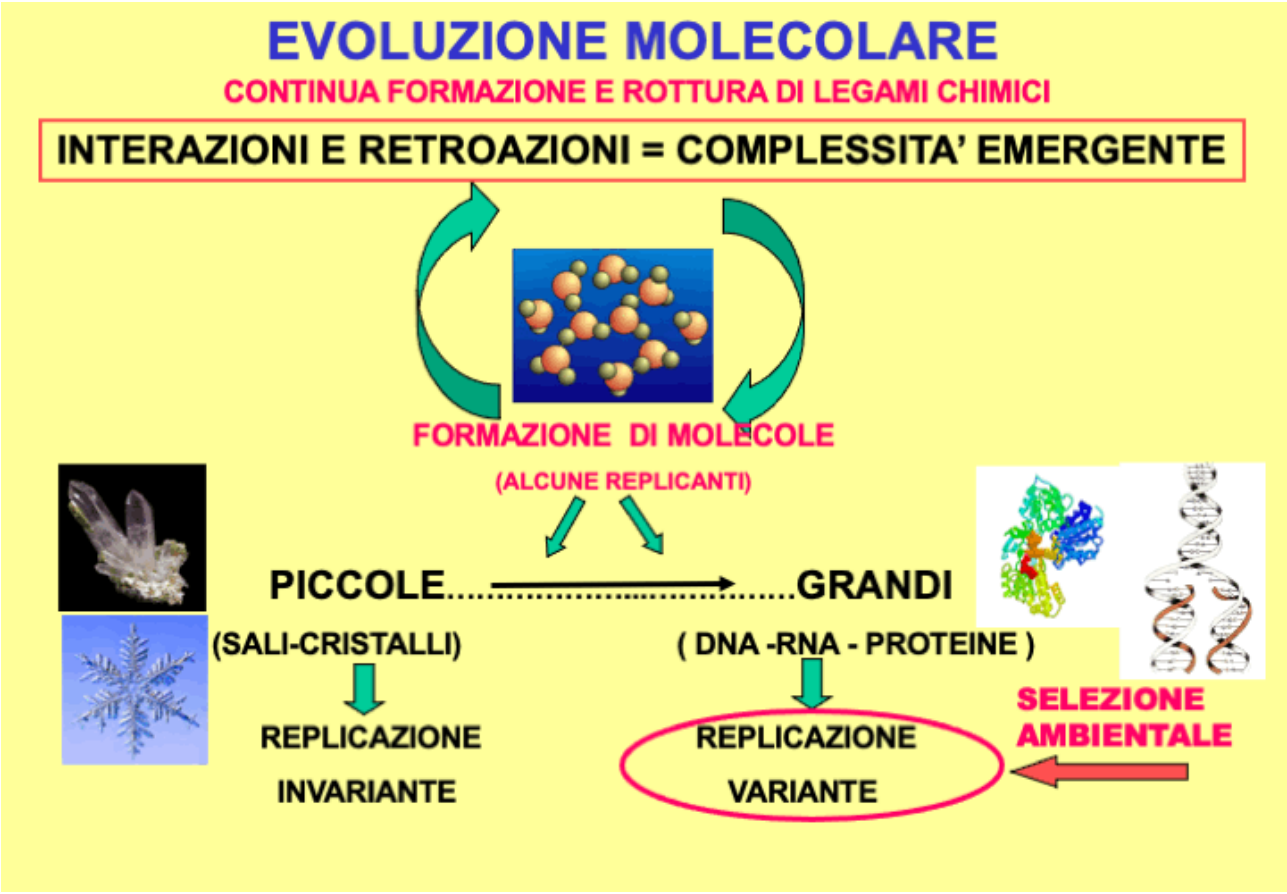


Fig. 3. Replicazione – Evoluzione.

La replicazione imperfetta di molecole grandi favorisce quindi la comparsa di molte varietà di molecole compatibili o meno con un determinato ambiente, e poiché, come vedremo, l'aggregazione e l'interazione dinamica anche di elementi semplici può dare origine a strutture complesse con proprietà emergenti innovative, la replicazione di strutture macromolecolari può produrre conseguenze stupefacenti come la vita (Fig. 4).

Questo meccanismo è potenzialmente simmetrico, nel senso che ad ogni replicazione possono formarsi copie con variazioni sia più che meno complesse dei loro precursori. Ma mentre esiste un *muro di complessità minima* oltre il quale una struttura molecolare non può sussistere o non ha capacità replicatorie, non sembrano invece esserci limiti per un aumento indefinito di complessità. Questa constatazione di asimmetria evolutiva è stata proposta da Gould per spiegare appunto il progressivo aumento di complessità nell'evoluzione biologica, e prende ormai il nome di **minimum complexity wall** (Fig. 5).

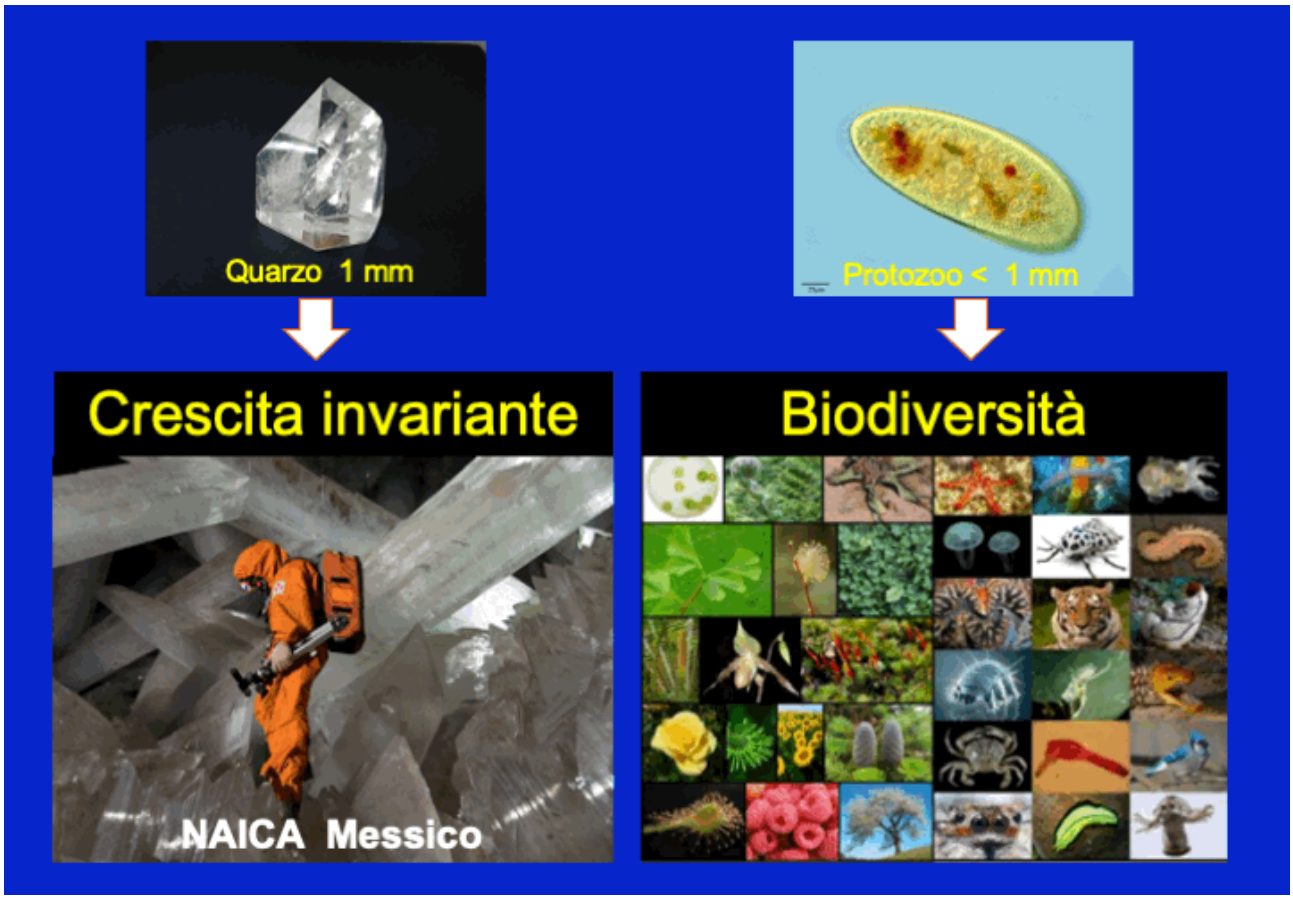


Fig. 4. Biodiversità.

La complessità degli organismi viventi è aumentata nel corso di milioni di anni perché l'inizio evolutivo è necessariamente comparso vicino al muro della minima complessità possibile, e successivamente è stata spinta da meccanismi retroattivi che hanno accelerato il processo. Più una struttura biologica è grande e complessa, più è probabile che compaiano mutazioni nel suo processo costruttivo (dal DNA al fenotipo), alcune delle quali non saranno compatibili con la vita, altre ne diminuiranno la complessità, altre la aumenteranno fino a che le condizioni ambientali lo consentiranno. Questo aspetto retroattivo (più complessità → più mutazioni → ancora più complessità) è la causa dell'andamento esponenziale dell'evoluzione biologica finora osservato.

Gli organismi viventi sembrano essere apparsi su questo pianeta più di tre miliardi e mezzo di anni fa, sotto forma di cellule procariote, microscopiche vescicole acquose separate dall'acqua circostante da una membrana molecolare lipoproteica che consentiva scambi selettivi di ioni o molecole tra l'interno e l'esterno, membrana che in altre parole isolava un piccolo volume di acqua e a causa della sua struttura determinava cosa poteva entrarvi e uscirne. Al momento attuale esistono alcune prove sperimentali di generazione spontanea di molecole grandi (aminoacidi), e di membrane lipidiche che automaticamente si strutturano in vescicole del tipo descritto come microscopiche bolle di sapone. L'ipotesi della *panspermia*, che ipotizza l'arrivo dei primi microorganismi biologici dallo spazio, non fa

altro che spostare la comparsa di queste strutture altrove rispetto a questo pianeta. Queste vescicole possono mantenersi solo in ambiente acquoso, ma l'ambiente interno alle vescicole, oltre all'acqua, può contenere concentrazioni elevate di particolari elementi e permettere reazioni chimiche protette. Se il bilancio energetico con l'esterno è favorevole, la vescicola può espandersi o crescere, e l'aumento di dimensioni può favorire il distacco di parte della membrana, con successiva rapida richiusura automatica delle due porzioni separate: in definitiva, duplicazione della vescicola. Ecco un altro meccanismo retroattivo positivo in azione: più la vescicola cresce, più vescicole si possono generare, con incremento esponenziale finché l'ambiente lo consente.

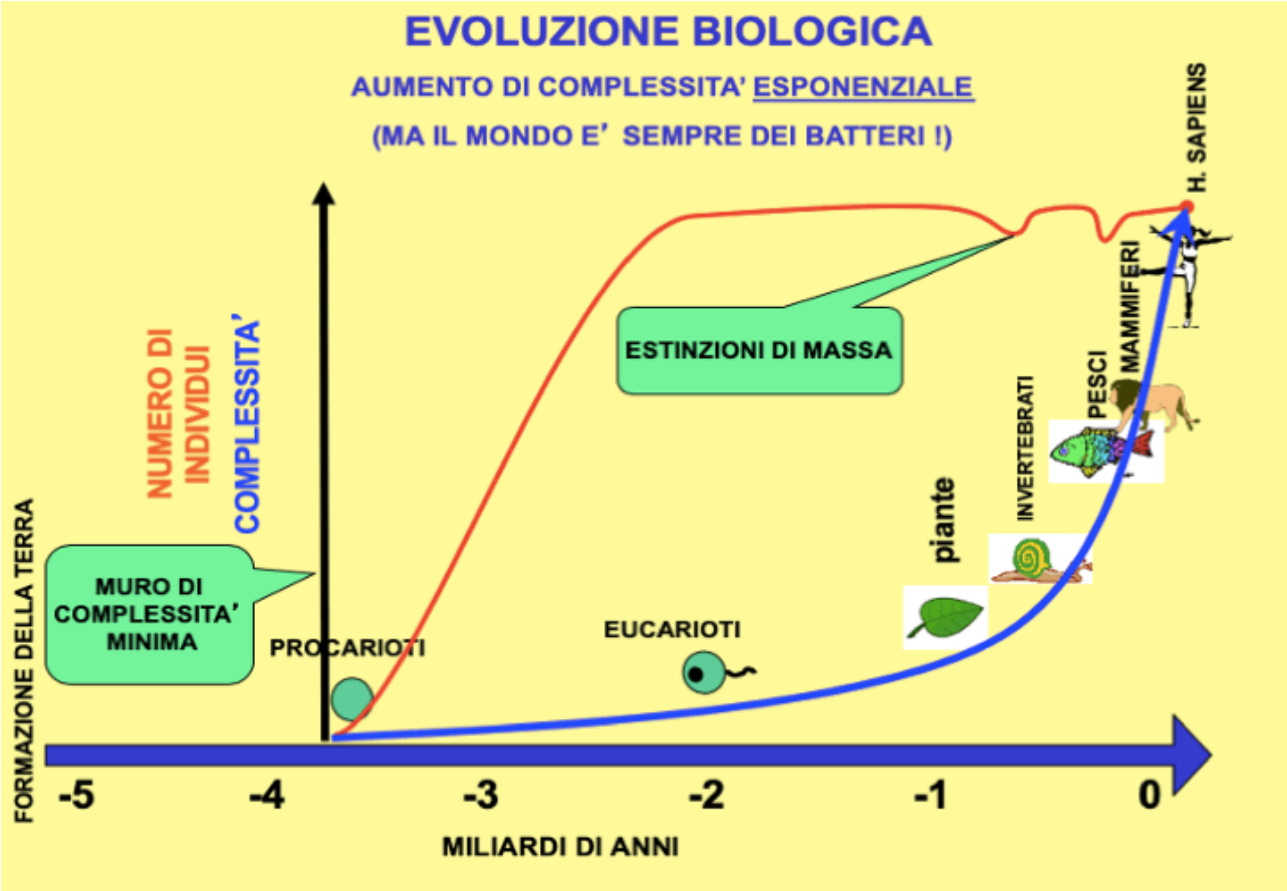


Fig. 5. Aumento di complessità. La linea rossa indica il numero complessivo di organismi viventi con oscillazioni che rappresentano alcune estinzioni di massa che hanno riguardato prevalentemente gli organismi pluricellulari. La linea blu rappresenta l'incremento esponenziale della complessità degli organismi, molto evidente nell'ultimo mezzo milione di anni.

È stato necessario forse più di un miliardo di anni perché comparissero organismi più complessi: le cellule eucariote, equipaggiate con organelli interni (alcuni inizialmente organismi separati, parassiti o simbionti) capaci di funzioni biochimiche particolari, come i mitocondri, e soprattutto con una struttura, il nucleo, dedicata a proteggere il piano di costruzione di quell'organismo: le molecole nucleiche RNA e DNA. Nelle cellule procariote, come i batteri, il DNA è fluttuante nel citoplasma, e parti di questo

vengono continuamente scambiate tra i batteri vicini. Di fatto si potrebbe affermare che i procarioti della stessa specie costituiscono un *organismo diffuso* con enormi e rapide capacità di adattamento ambientale: essi infatti scambiano *orizzontalmente* tra loro i codici molecolari delle nuove strategie di sopravvivenza che sviluppano (proteine ed enzimi), mentre gli organismi eucarioti, con la segregazione e protezione nucleare del DNA nel nucleo e i meccanismi ontogenetici che li contraddistinguono, li trasmettono *verticalmente* da genitore a figlio, con minore velocità quindi, ma con maggiore stabilità e complessità di specie.

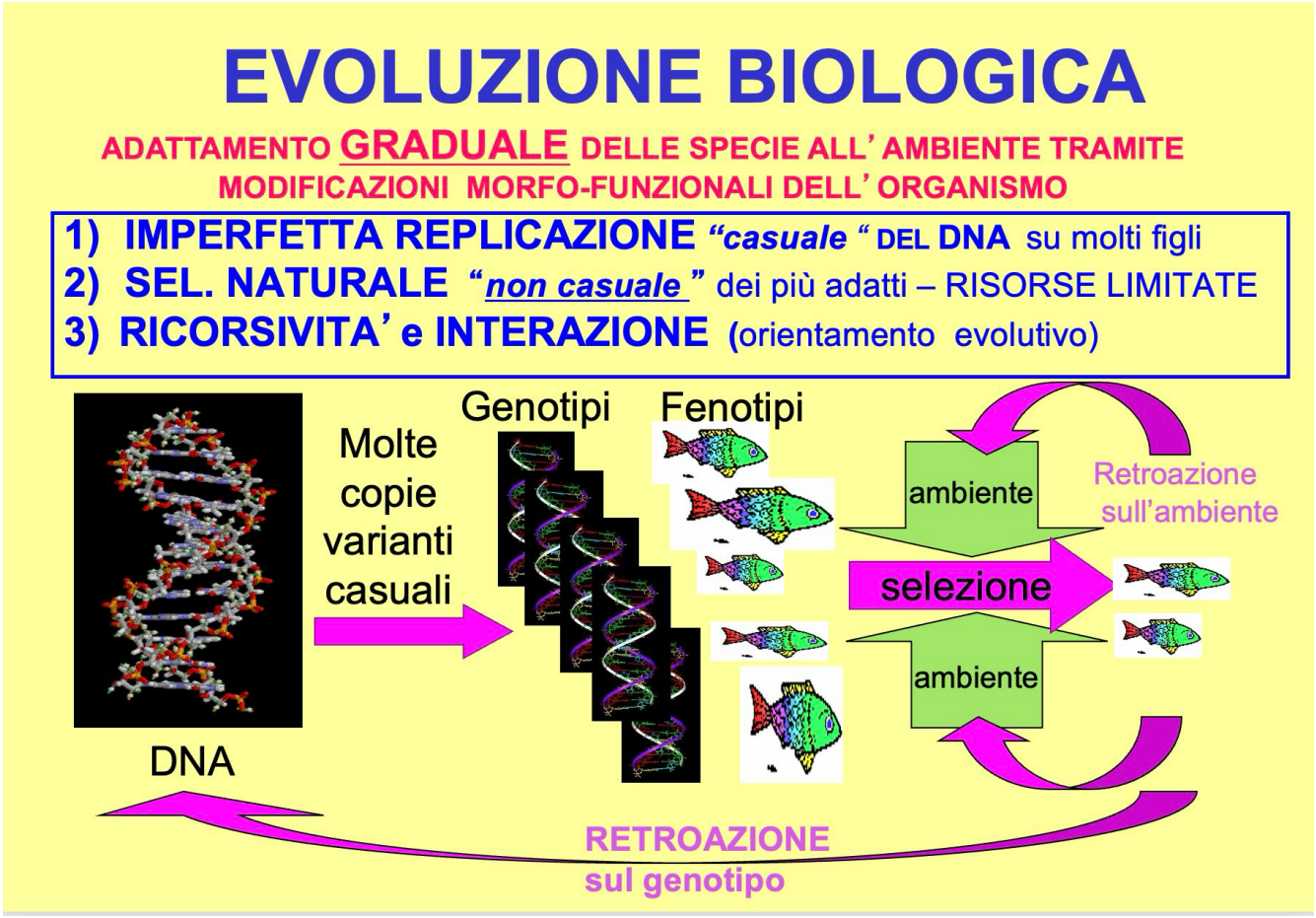


Fig. 6 (animata). Meccanismi dell'evoluzione biologica.

La replicazione mediante un codice genetico protetto, che costruisce de novo un individuo simile al progenitore (ontogenesi), ha costituito un enorme vantaggio evolutivo; sia, come si è detto, per quanto concerne la maggiore stabilità della specie grazie alla ridotta variabilità della sequenza del DNA, sia per l'eliminazione di parassiti e danni che intervengono costantemente nella vita di ogni organismo. L'ontogenesi costituisce un efficace collo di bottiglia ove i parassiti non possono passare e i danni, i cambiamenti fenotipici (le modificazioni del corpo prodotte dall'esercizio, dall'usura o dagli incidenti, subite dal singolo individuo nel corso della vita) non vengono trasmessi. Il susseguirsi delle generazioni con mutazioni, nascite e morti sembra essere il meccanismo più efficace per la propagazione e

diffusione degli organismi viventi. L'alternativa della vita eterna è perdente, poiché, contro un organismo che è ipoteticamente immortale per aver raggiunto la pur improbabile condizione d'immunità totale da danni o la capacità di ripararli tutti, alcuni parassiti e predatori meno perfetti, ma che invece si riproducono ed evolvono, troverebbero infine una strada per superare le sue difese.

In definitiva, l'evoluzione biologica e la continua modificazione delle specie sono la conseguenza di un tiro alla fune tra meccanismi che tendono a replicare il più fedelmente possibile le macromolecole genetiche che costituiscono il piano, la *ricetta* dell'individuo, ed i meccanismi ambientali che interferiscono in questo processo e tendono a modificare nel bene o nel male la ricetta.

Sinteticamente: l'evoluzione biologica è conseguenza dell'imperfetto meccanismo di replicazione del DNA in più copie simili, ma non identiche, e dell'azione selettiva ambientale che produce una sopravvivenza differenziata, a cui si aggiungono gli effetti retroattivi dovuti alla presenza nell'ambiente degli organismi stessi e del loro comportamento (Fig. 6).

Non che l'evoluzione non potesse generare un meccanismo di perfetta replicazione, ma piuttosto è probabile che sia risultato vincente un meccanismo di produzione di tante repliche non identiche ("discendenza con modificazioni", Darwin), poiché ciò costituisce una miniera inesauribile di variabilità in un ambiente mutevole, ed è quindi vantaggiosa rispetto all'immutabilità di una specie perfettamente adattata all'ambiente in cui vive, ma incapace di adattarsi alle probabili variazioni di questo. Per quanto crudele ai nostri occhi, una progenie numerosa, superiore a quella che le risorse ambientali possono mantenere, e quindi un'elevata incidenza di selezione naturale differenziata, costituisce un ottimo meccanismo per promuovere l'adattamento delle specie all'ambiente mutevole. In quest'ottica i cataclismi o le criticità ambientali, stagionali ad esempio, se non troppo distruttivi, accelerano il processo evolutivo, anche perché in queste situazioni si è spesso osservato un incremento della fertilità negli individui superstiti, probabilmente prodotto dal nuovo rapporto favorevole risorse/popolazione che può essersi manifestato. Non è un caso che l'avvicendarsi delle stagioni rappresenti un *setaccio* e la primavera sia il periodo di maggiore riproduzione per moltissime specie.

In questo processo selettivo della popolazione l'elemento *economia* gioca un ruolo determinante. Economia nel senso che, a parità di efficacia delle strutture e comportamenti che assicurano la sopravvivenza, vengono inevitabilmente premiati con maggior progenie gli individui che consumano meno energia per mantenersi in vita. Di fatto questo tende a ottimizzare la costituzione della specie in quel contesto. Sinteticamente, prevalgono le strutture ed i comportamenti con miglior rapporto costi/benefici. Ogni aspetto finalistico dell'aumento di complessità degli organismi è solo apparente. In realtà, tautologicamente, sopravvivono solo le specie che riescono a farlo tra tutte le possibilità che continuamente si presentano. Come già detto, l'evoluzione produce continuamente cambiamenti in entrambe le direzioni, verso sia minore che maggiore complessità degli individui, aumentando continuamente la biodiversità, e conseguentemente la selezione dei più adatti in ciascun contesto. Precisiamo che per *più adatti* s'intende sempre: *più adatti a generare prole fertile nell'ambiente contestuale*. Non è contemplata alcuna valutazione o previsione d'altro tipo.

Qualcuno definisce l'evoluzione come un processo automatico intrinsecamente non direzionato. Non siamo del tutto d'accordo. Una parte del processo, la mutazione di parti del DNA, può sicuramente

essere casuale, ma la successiva selezione naturale è certamente orientata. Da cosa? Dall'interazione tra genotipo (DNA), fenotipo (corpo) e ambiente, che dirige consistentemente le mutazioni che si verificano consentendo la sopravvivenza solo di quelle contestualmente più adatte. A sua volta la situazione ambientale è fortemente influenzata dalla presenza della vita stessa in tutte le sue forme, per le modificazioni delle risorse e delle avversità che ne conseguono, oltre che da cause planetarie ed extraplanetarie. In definitiva l'evoluzione non prevede il futuro, ma il presente la orienta sicuramente. Ad esempio la produzione di ossigeno, come materiale di scarto, da parte delle alghe unicellulari primitive ha modificato talmente l'atmosfera primordiale della terra, inizialmente scarsa di questo elemento, da orientare l'evoluzione verso la vita aerobica (specie che utilizzano l'ossigeno per sopravvivere). E questo conferma che la "vita" è in grado di modificare il Pianeta! I processi ricorsivi possono innescare cambiamenti molto potenti che modificano continuamente qualunque struttura organica e inorganica.

Anche senza scomodare effetti così macroscopici, la presenza contemporanea nell'ambiente di molti individui della stessa specie, e ancor più di specie differenti, produce tali variabilità di risorse, di competizioni e di cooperazioni, che riuscire ad immaginare il reale assetto della pressione evolutiva sulle singole specie è un compito pressoché impossibile (interazione e retroazione). Basterebbero due caratteristiche del sistema evoluzione: l'enorme numero di variabili più o meno correlate, e la retroazione degli effetti, a classificarlo un sistema complesso e pertanto imprevedibile e creativo (proprietà emergenti). Da questo punto di vista alcune diatribe sulla progressione continua (Dawkins) piuttosto che punteggiata (Gould) dell'evoluzione appaiono senza senso, dacché qualunque *sistema complesso* evolve con variabilità non prevedibile, con periodi di stasi, o di oscillazioni più o meno semplici, improvvise catastrofi, e riorganizzazione a livelli differenti.

Inoltre il genoma è organizzato gerarchicamente nel senso che alcuni geni di livello superiore possono condizionare l'attivazione o meno di molti altri geni subordinati. Ne consegue che una mutazione casuale a livello dei geni subordinati potrebbe apportare modifiche minime al fenotipo, mentre nella mutazione di un gene superiore, le modifiche sono di regola molto più evidenti, perché ne verranno influenzati molti geni subordinati. In questa evenienza, negli sporadici casi utili, si può osservare un salto evolutivo rilevante.

Ma anche l'accumularsi progressivo di piccole mutazioni (*deriva genetica*) può rendere alcuni individui di una popolazione tanto diversi geneticamente dagli altri (*divergenza genetica*) al punto da non potersi più accoppiare meccanicamente o non generare prole o generare ibridi non fertili (es. mulo, bardotto). Tale condizione, *isolamento riproduttivo*, dà origine a specie diverse. L'isolamento riproduttivo può instaurarsi anche per fattori ambientali che separano fisicamente la popolazione in gruppi che di fatto vengono impossibilitati all'accoppiamento (es. fringuelli delle isole Galapagos, Darwin) e solo successivamente la divergenza genetica subentra, non più contrastata dal rimescolamento genetico precedente la separazione dei gruppi.

Le nuove specie, che in questo modo si manifestano, proseguono la propria evoluzione adattiva all'ecosistema. Ogni ecosistema è un sistema complesso, se non altro per la presenza delle specie che lo condividono con le interazioni che ne conseguono, ed ogni specie con il suo comportamento o

fenotipo esteso (vedi più avanti) interagisce con un particolare insieme di caratteristiche dell'ambiente condiviso che costituisce la cosiddetta **nicchia ecologica** della specie. Una nicchia ecologica non esiste prima della specie che la occupa, e le specie possono estendere o modificare la propria nicchia, sempre in funzione del tiro alla fune dei costi/benefici. Consideriamo cos'è accaduto alla nicchia dell'Homo Sapiens, passata dalla savana al globo intero…. e oltre, e che ha incluso progressivamente tutti i cambiamenti ambientali e tecnologici da lui stesso prodotti. Si può dire che sia **diversa da individuo a individuo** in conseguenza delle proprie conoscenze e abilità operative.

Nell'ambito di tutte le specie viventi l'isolamento riproduttivo tra specie simili di fatto mantiene separati genomi diversi che si sono specializzati per la sopravvivenza e riproduzione con nicchie diverse, il che è vantaggioso in quanto l'incrocio forzato fra specie specializzatesi diversamente (ove possibile in specie ancora geneticamente compatibili) genera individui meno efficaci/efficienti dei genitori, come dimostrato da McBride e Singer nei loro bei lavori sulle farfalle *Euphydryas editha*.

La forma e il comportamento di tutti gli organismi viventi sono fortemente interconnessi e per comprendere meglio i processi evolutivi è bene distinguere tra **struttura e funzione**. la funzione dipende dalla struttura che la genera e dalla sua interazione con altre strutture corporee e con l'ambiente, e la sua efficacia sulla sopravvivenza/riproduzione dipende dal rapporto costo/ beneficio.

La riproduzione produce casualmente nuove strutture nell'organismo, o variazioni di queste. La selezione naturale premia differenzialmente la possibilità di sopravvivenza del singolo individuo in funzione del suo comportamento nella interazione ambientale. Di conseguenza sopravvivono le strutture che funzionano sempre meglio (ricorsività).

Questo processo non ha nessuna possibilità di previsione, ma raggiunge automaticamente sempre il miglior risultato, in un ambiente stabile, e tende a raggiungerlo in un ambiente non stabile, come sempre è.

Quindi se una struttura o parte di questa persiste per un numero consistente di generazioni, ed appare quindi *ereditaria,* significa che contribuisce utilmente alla conservazione e riproduzione della specie e allora la domanda da porsi per cercare di comprenderne l'esistenza è: "**a cosa serve** questo enzima, questa proteina, quest'organo, questa forma ossea, questo comportamento?". Rispondere a questa domanda non è detto che sia semplice, o addirittura possibile in certi casi, per l'insieme di interazioni e retroazioni con altre strutture dell'individuo e con l'ambiente, ma ha il vantaggio di focalizzare l'attenzione del ricercatore sulla pressione selettiva dei processi evolutivi presente in quelle condizioni, e spesso la risposta è illuminante.

La semplicità con cui l'evoluzione viene descritta (selezione naturale tra più copie simili di organismi e riproduzione di questi con variazione) ne ostacola la piena accettazione, non esaltandone a sufficienza gli aspetti retroattivi e auto-catalitici. Sono questi a rendere l'evoluzione naturale il potentissimo sistema creativo e adattivo che è.
A nostro parere questo aspetto retroattivo che accelera e orienta l'evoluzione verso organismi sempre più complessi, ben visibile negli ultimi di milioni di anni, non è sufficientemente valutato come dovrebbe.

Si comprende quanto questo processo sia rilevante, quando si osserva che è in grado di modificare l'ambiente intero, il pianeta, più o meno inconsapevolmente (ossigeno sul pianeta e parte dei cambiamenti climatici attuali), non solo le specie viventi.

E questo porta l'attenzione alla complessità (nel significato che abbiamo già definito) delle dinamiche retroattive e interattive del sistema globale che lo rendono davvero imprevedibile, creativo e sempre mutevole.

In realtà, anche se la spiegazione dei meccanismi evolutivi è semplice, sottende una serie di condizioni (a loro volta conseguenze evolutive) che si possono riassumere seguendo Cairns-Smith come segue:

1. **se** esistono molecole che si riproducono (**replicazione**);
2. **se** capitano variazioni accidentali nella replicazione (**mutazioni**);
3. **se** queste mutazioni possono essere riprodotte (**eredità**);
4. **se** alcune mutazioni migliorano la sopravvivenza e la riproduzione (**adattamento o fitness**);
5. **se** c'è sovrapproduzione di individui rispetto alle risorse (**sopravvivenza differenziata**);
6. e noi aggiungiamo: **se** l'ambiente è mutevole, e lo è sicuramente, se non altro per la variabile presenza di vita che ne modifica struttura, risorse e avversità (**retroazioni e interazioni**)

   allora: la vita emerge, si diffonde ed evolve.

La necessaria presenza di almeno queste sei condizioni fa pensare ancora a molti che per questo sia necessario un progetto, e quindi un progettista. Ma questa è solo una speculazione umana. Le cose sono molto più semplici: esiste solo quello che resiste almeno per un po'. Ci rendiamo conto della banalità di questa affermazione: non è una spiegazione, ma una constatazione. Nell'infinita gamma di condizioni possibili, su questo pianeta e probabilmente su moltissimi altri, queste sei condizioni sono quelle che hanno consentito lo sviluppo della vita e della sua mutevole biodiversità, e per questo *esistono*, ma non pre-esistono. Questo concetto si estende anche alle leggi e costanti fisiche che conosciamo e che consentono l'esistenza dell'universo noto. Qualcuno si meraviglia che siano così precise e adeguate e che diversamente l'universo non potrebbe esistere… appunto! Queste costanti sono una conseguenza non la causa della sua esistenza. Ammesso poi che siano veramente "costanti ". Potrebbero apparire così alla nostra scala di osservazione ma non ad altri livelli (quantistico, o cosmologico) potrebbero essere delle "congetture" per far funzionare le equazioni matematiche che abbiamo inventato; non "scoperto"! Le ultime osservazioni fornite dal telescopio spaziale James Webb sembrano alimentare questi dubbi.
Quello che appare sorprendente è che meccanismi evolutivi ciechi e reattivi solo alle condizioni contestuali e locali abbiano progressivamente sviluppato organismi inizialmente anch'essi reattivi solo alle condizioni variabili *dell'ambiente contestuale molto prossimo* (microorganismi), poi reattivi a *condizioni contestuali variabili anche distanti* (animali), ed infine organismi in grado di *prevedere condizioni ambientali future* in modo da orientare meglio il comportamento più utile alla loro sopravvivenza e riproduzione (predatori).

Come dire: **l'evoluzione non è un progetto ma ha prodotto organismi che progettano**.

“Il Caso e la Necessità” J. Monod 1970. Che bel libro! Dovrebbe essere inserito tra i libri scolastici più importanti, con le dovute spiegazioni.

Un altro aspetto spesso contestato del modello evoluzionistico è la comparsa di organi altamente specializzati, come ad esempio l’ala o l’occhio, di cui abbozzi o versioni parziali non funzionerebbero (qualcuno dice che mezzo occhio non serve a nulla o un’ala corta non fa volare). Una critica banale ai meccanismi evolutivi (Fred Hoyle: “Hoyle on Evolution”, Nature, Vol. 294, Nov. 12, 1981, p.105), purtroppo largamente diffusa e continuamente citata, paragona la comparsa dell’occhio, delle ali o di qualunque altra struttura complessa, alla comparsa improvvisa di un aereo a reazione assemblato casualmente da una tromba d’aria in una discarica di spazzatura: come dire impossibile, ci vuole un progetto e un costruttore.

Per favore! L’evoluzione non ha nulla a che fare con questo esempio idiota (in questo caso senza nessun rispetto per Hoyle, che forse avrebbe fatto meglio a fare lo scrittore di fantascienza piuttosto che il fisico filosofo, almeno a giudicare dal suo bel libro fantascientifico “La Nuvola Nera” e dalle smentite invece ricevute dalla sua teoria dell’universo stazionario). Il *gradualismo* (il perfezionamento progressivo di una struttura funzionale attraverso le specie) è un concetto insito nei meccanismi evolutivi, troppo spesso sottovalutato perché, si trascurano i meccanismi retroattivi già ampiamente citati che dirigono i processi evolutivi. La comparsa casuale di una piccola mutazione nella costituzione di un organismo, (una proteina, una funzione, una struttura, un comportamento) che risulti appena più vantaggioso per la sopravvivenza/riproduzione, **focalizza automaticamente (**vedi avanti) la pressione evolutiva su questa mutazione e quindi la sopravvivenza differenziale degli organismi che la presentano, con effetti retroattivi che incrementano esponenzialmente questo iniziale piccolo vantaggio.

La popolazione che sopravvive alla selezione naturale avrà sempre una **distribuzione di fitness asimmetrica positiva** (con il numero degli individui maggiore verso i valori più alti di fitness, la media sarà quindi sempre spostata verso questi valori alti). Questa parte di popolazione, la più numerosa, sarà quella che genererà più figli, quindi la generazione dei figli avrà mediamente un valore di fitness medio più alto di quello dei genitori, avrà subito parimenti delle mutazioni casuali e la successiva selezione ambientale produrrà, come nella prima, una distribuzione asimmetrica ancor più in favore degli individui con miglior fitness. Questo processo ricorsivo farà si che maggioranza della popolazione raggiugerà rapidamente il massimo della fitness consentita dall’ ambiente.

Sinteticamente: l’evoluzione è rapida e tendenzialmente esponenziale perché le mutazioni casuali si manifestano sempre di più, ad ogni generazione, sui discendenti degli individui superstiti più adatti all’ambiente (fig.7). In questo modo l’evoluzione si concentra automaticamente sulle strutture che manifestano la maggiore efficienza funzionale ai fini della sopravvivenza e riproduzione migliorandole con velocità esponenziale correlata all’incremento di efficienza.

Si può dire: **più il cambiamento funzionale è utile più rapidamente viene migliorato automaticamente.** Finché il costo/beneficio lo consente.

Questo avviene in un ambiente stabile, ma normalmente non è così per variazioni planetarie o prodotte dalla presenza della “vita” stessa che modifica spazi, risorse, pericoli (retroazioni ancora al lavoro!).

Quindi nella realtà il massimo della fitness per una specie non si raggiunge quasi mai, ma questo favorisce la "speciazione", la biodiversità, perché le mutate condizioni ambientali possono ora favorire individui con una fitness che era bassa per l'ambiente precedente ma che ora può espandersi (fig.8).

Un esempio: anche la presenza di un solo fotorecettore nel corpo di un organismo primitivo, che gli permetta di distinguere solo il giorno dalla notte, costituisce un notevole vantaggio rispetto a chi non lo possiede; e anche un'ala abbozzata può allungare un salto di salvezza. Il vantaggio offerto dalla comparsa di un solo fotorecettore che permetta la distinzione tra luce e buio favorisce la vita e riproduzione di questi individui rispetto a quelli completamente ciechi. Anche se le probabilità di mutazione dei singoli individui fossero uguali, ad ogni successiva generazione nella popolazione vi sarebbero comunque più *vedenti,* perché più adatti a sopravvivere, e quindi più individui con probabilità di ulteriori mutazioni della vista rispetto alla minoranza meno vedente, con la possibilità, ad esempio, che compaiano individui con più fotorecettori, e poi nei discendenti di questi ultimi individui, *più numerosi perché più adatti dei primi*, piastre di molti fotorecettori contigui, e nei loro più numerosi discendenti invaginazioni di queste piastre che permettono una migliore individuazione delle zone illuminate, e così di seguito esponenzialmente fino alla comparsa, relativamente rapida, di un occhio complesso.

Cogliete la potenza dei meccanismi retroattivi che in tempi evolutivi relativamente brevi hanno portato alla formazione di occhi *funzionalmente* simili indipendentemente in molte specie diverse, dai cefalopodi agli umani? E in tre milioni di anni (un batter d'occhio, evolutivamente parlando) hanno trasformato una scimmia pelosa in una scimmia nuda consapevole di esserlo? Nessun progetto: solo selezione automatica di piccoli miglioramenti in potenti cicli retroattivi.

In realtà tutti i processi evolutivi hanno un andamento sigmoidale. In un nuovo o modificato ambiente, all'inizio si verifica un lento miglioramento della fitness della specie, lento perché la popolazione iniziale nella sua maggioranza non ha sviluppato funzioni adattive adeguate al nuovo ambiente. In una fase intermedia le mutazioni casuali si concentrano sulla popolazione che sopravvive alla selezione naturale, che necessariamente è quella a maggior fitness, cosicché l'andamento evolutivo è di tipo esponenziale. Ma ad un certo livello di fitness la riduzione di probabilità di mutazioni ancora più performanti frena ulteriori miglioramenti (a meno che non si modifichino le risorse ambientali) (Fig. 7).

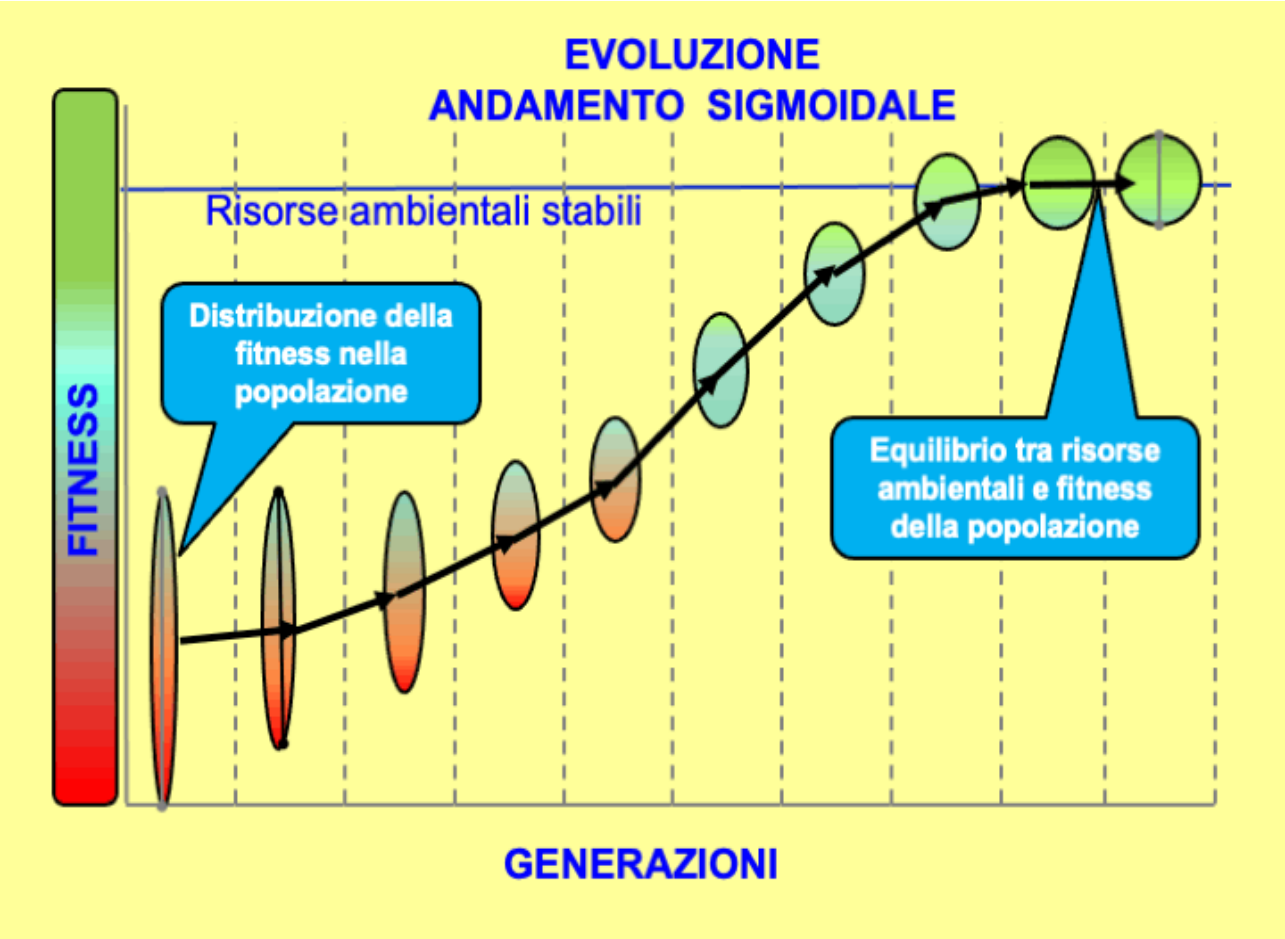


Fig. 7. Evoluzione. Equilibrio risorse-popolazione

Sembrerebbe quindi che la specie abbia raggiunto una condizione di equilibrio tra numerosità di individui e risorse, ma nel corso di questo andamento sigmoidale possono comparire mutanti talmente diversi dalla specie esistente che riescono ad individuare risorse inaspettate e innescare quindi un differente cammino evolutivo anch'esso sigmoidale che definirà una nuova specie (*speciazione*). Oppure come si è detto una variazione delle condizioni ambientali può favorire l'espansione di una popolazione di individui che prima avevano un basso valore di fitness. (Fig. 8).

I meccanismi evolutivi sono talmente potenti, comprensibili, ed ora verificabili, che infangarli con creazionismi e intelligenze metafisiche è davvero un insulto alla razionalità e all'evoluzione stessa. Si sa, il pensiero magico deriva dalla curiosità insita nella specie umana e dalla constatazione che tutti gli eventi che percepiamo hanno una causa, a volte conoscibile a volte no, e quando questa non è nota è necessario inventarla per placare l'ansia emergente; ma trasformare il pensiero magico in realtà scientifica è delittuoso. *Disegno intelligente*? Certo che esiste, lo abbiamo detto: è quello umano, che da millenni seleziona intenzionalmente vegetali e animali e li fa riprodurre per ottenere egoisticamente

specie più utili per la sua sopravvivenza. Ma il sistema evolutivo naturale è intrinsecamente molto più creativo e adattivo, proprio perché non ha un progetto, e manifesta automaticamente e continuamente soluzioni innovative che vengono vagliate dall'interazione con l'ambiente.

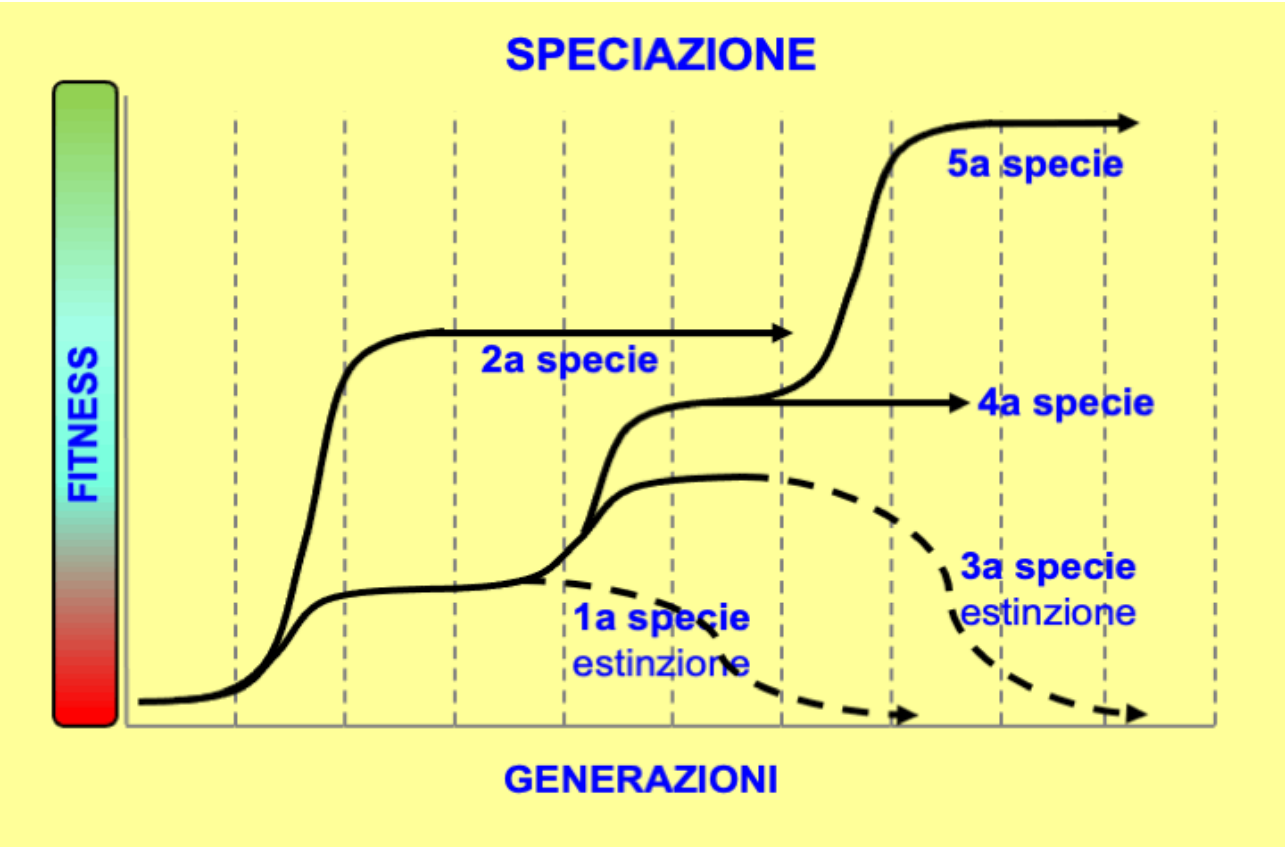


Fig. 8. Speciazione. Da un gruppo geneticamente comune si differenziano due specie, una (2a specie) più adattata, l'altra (1a specie) meno. Quest'ultima si estingue, non senza però prima originare altre tre specie (3a, 4a e 5a) che evolvono con destini differenti.

Ci scusiamo di ripeterlo, ma questo concetto è fondamentale per comprendere appieno i meccanismi evolutivi: **VARIAZIONE → SELEZIONE → RETROAZIONE**.

Sono I meccanismi retroattivi che accelerano esponenzialmente l'evoluzione di un organo o di un comportamento efficiente, perché, come abbiamo detto, la distribuzione di fitness asimmetrica positiva, retroattivamente, ad ogni generazione si sposta verso una fitness media più alta se l'ambiente non cambia troppo.

Abbiamo già detto che il progressivo aumento di fitness della popolazione rallenta quando questa arriva ad un livello tale che la probabilità di mutazioni migliorative diventa minore di quella di mutazioni neutre o peggiorative. Tuttavia, quando una rara mutazione migliorativa casualmente avviene, la

velocità della sua diffusione nella popolazione nelle generazioni successive è determinata solo da quanto essa è migliorativa, perché si diffonde per ereditarietà e non per mutazione. Se compare una mutazione molto improbabile, ma molto migliorativa, la sua diffusione nella popolazione può essere talmente esplosiva da apparire come un salto evolutivo; ma in realtà il suo meccanismo è lo stesso delle piccole e continue mutazioni delle generazioni precedenti.

Invecchiamento

Il fatto che i singoli individui debbano morire è ben comprensibile sul piano evolutivo, se non altro per non far mancare risorse e spazio ai propri discendenti, alcuni dei quali probabilmente più adatti dei genitori ai cambiamenti ambientali che devono affrontare. Ma perché si invecchia, ci si deteriora più o meno lentamente? Il motivo più probabile risiede proprio nei meccanismi selettivi evolutivi. Se una mutazione negativa compromette l'esistenza giovanile dell'individuo, e di conseguenza riduce la sua capacità riproduttiva, prima o poi questa mutazione sarà eliminata automaticamente, perché i figli portatori della mutazione saranno sempre meno numerosi di generazione in generazione. Se viceversa la mutazione negativa produce i suoi effetti in individui adulti, che magari hanno già generato molta prole, non sarà facile che questa mutazione venga eliminata, proprio perché molti figli apparentemente sani sono già nati. In breve, le patologie dell'individuo anziano sfuggono alla selezione naturale. L'invecchiamento quindi sarebbe imputabile ad un accumularsi di mutazioni negative a comparsa tardiva. Certo l'evoluzione avrebbe potuto allungare gli intervalli di riproduzione fra le generazioni in modo da riportare anche queste mutazioni entro la sua *cattura*: se non l'ha fatto è perché evidentemente è più economico ed efficace creare frequentemente nuovi corpi, freschi e sani e selezionabili dagli eventuali mutamenti ambientali, piuttosto che creare corpi potenzialmente longevi, che però prima o poi soccomberebbero di fronte ai mutamenti ambientali ed a parassiti e predatori capaci di mutare continuamente. O piuttosto al fatto che mantenere in vita organismi adattati ad un ambiente ormai mutato è controproducente, per la riduzione di risorse, per quella parte delle nuove generazioni casualmente più adatte alle nuove condizioni. La specie umana potrebbe allungare la vita individuale imponendo un'età minima per procreare, ed innalzando lentamente questa età minima, ad es. di un anno ogni 25 anni (corrispondenti grosso modo ad una generazione); ma probabilmente, per i motivi appena detti, non sarebbe una buona idea, v. anche cap. 10 *L'altro replicante.*

Sempre su questo argomento ci si può domandare perché la durata della vita sia cosi differenziata tra le molte specie viventi. Alcuni esempi:

- Polpi 2 anni
- Colibrì 10 anni
- Pecore 10 anni
- Cicale 17 anni (16 in forma larvale quasi immobile sottoterra!)
- Pappagalli 80 anni
- Pesce sebastes (scorfani) anche 200 anni
- Squalo dell'artico (Somniosus microcephalus) 500 anni. Sonnolento e microcefalo e vive 500 anni …… che razza di vita!

La durata della vita non sembra correlata con la velocità del metabolismo, che invece è sufficientemente correlata con le dimensioni dell'animale (anche se gli animali più grandi hanno generalmente metabolismo più lento). Quale può essere allora il motivo? Sembra sia la probabilità di essere predati. Un polpo, animale molto più intelligente di molti pesci, non ha molte capacità di difesa: né passive (corazze, aculei) né attive (zanne, veleni), ed evidentemente i suoi tessuti sono molto desiderabili per molti predatori (uomo compreso). Viceversa, uno scorfano è pieno di spine ed aculei velenosi, e le sue dimensioni sono modeste: evidentemente per un predatore non è un bersaglio interessante. Le cicale vivono sotto terra in forma larvale, in alcune specie per 16 anni (inspiegabilmente), ed escono in volo una sola estate per riprodursi e morire. I processi evolutivi tengono conto di queste caratteristiche, tanto che nelle specie a breve vita i meccanismi procreativi sono concentrati in una sola stagione. Nei polpi la femmina depone una enorme quantità di uova una sola volta, dopodiché muore, predata o meno. Le cicale, finché sono sottoterra in forma larvale, non hanno molti predatori e sopravvivono in moltitudine, ma quando si trasformano in insetti volanti hanno poco tempo per riprodursi una sola volta e poi morire, predate o meno anch'esse. Pappagalli e scorfani, così longevi, si riproducono annualmente per moltissimi anni, con prole annualmente non molto numerosa, perché evidentemente per loro la predazione non è un evento frequente.

Evoluzione dell'evoluzione (dei suoi meccanismi)

Qualcuno potrebbe dire: "per quanto semplici, i meccanismi evolutivi biologici si basano su processi riproduttivi assai complessi, come la differenziazione in generi e gli elaborati rituali di accoppiamento di uccelli e mammiferi. Perché mai?"

L'evoluzione si basa sulla variabilità genetica prodotta dalle mutazioni del DNA e dalle ricombinazioni di porzioni del DNA. La mutazione è un evento inevitabile in una replicazione imperfetta. La ricombinazione è un processo selezionato dall'evoluzione stessa per aumentare la variabilità, e come tale riguarda animali molto evoluti. Ma l'evoluzione è iniziata con processi riproduttivi molto più semplici, come la gemmazione in organismi unicellulari, ove la variabilità è solo per mutazione; e solo successivamente, con l'aumento di complessità delle specie, l'evoluzione ha scovato meccanismi più sofisticati come la riproduzione partenogenetica, e infine quella sessuata, nella quale il fattore principale di variabilità è la ricombinazione. Per soffermarci solo su queste due modalità, in alcune specie (molluschi, pesci e rettili) i singoli individui possono optare durante la loro vita per l'una o l'altra modalità riproduttiva in funzione delle condizioni ambientali: quando l'individuo è isolato, o comunque è difficile trovare un partner, la partenogenesi assicura una prole (clone della madre) con poco dispendio energetico, ma anche poca variabilità (solo per mutazione), e quindi poco adattabile ad eventuali variazioni ambientali. Quando invece è possibile l'accoppiamento tra generi la prole ha il vantaggio di essere una combinazione delle caratteristiche dei genitori, con possibile emergenza di combinazioni innovative, e quindi di essere maggiormente adattabile e resistente. Insomma la selezione naturale fa evolvere non solo le specie, ma anche i processi evolutivi stessi (retroazione operante anche a questo livello). Quanto poi ai complicati rituali di accoppiamento, questi hanno la loro ragion d'essere in quella che viene definita *selezione sessuale*, che tende ad ottimizzare i risultati riproduttivi scegliendo i genitori migliori (sempre i più adatti all'ambiente attuale).

Selezione sessuale

Nella modalità partenogenetica, che molti molluschi utilizzano attualmente, il patrimonio genetico della prole può essere modificato solo per mutazione, e mutazioni migliorative sono tanto più rare quanto più la specie è già evoluta, ovvero adattata all'ambiente. Il processo evolutivo per mutazione è quindi molto lento. La comparsa della distinzione in due generi, maschio e femmina, è stata un'innovazione molto efficace nell'incrementare la variabilità della progenie, per il continuo rimescolamento di caratteristiche che produce, e quindi nell'aumentare la velocità dell'evoluzione. Nel mondo animale, primati inclusi, il compito principale, e in molti casi unico, del maschio è quello di essere *solo* un rimescolatore del patrimonio genetico della specie. L'evoluzione ha promosso l'accoppiamento con gli esemplari più dotati nell'ambiente in cui vivono. La femmina spende energie e tempo nella gestazione e spesso nell'allevamento della prole, cosicché alla specie è utile che (nel frattempo) il maschio fecondi le eventuali altre femmine disponibili. Nell'ambiente naturale la prestanza fisica, la rapidità, le capacità difensive e di procacciamento di cibo sono state per milioni di anni le qualità vincenti. L'ostentazione di queste qualità nel maschio è diventata quindi un elemento decisivo ai fini dell'avvicinamento alle femmine e dell'accoppiamento. Il colorato piumaggio degli uccelli, gli enormi palchi di corna di alcuni erbivori, le maggiori dimensioni corporee, le competizioni tra maschi ecc., hanno questa funzione e trasmettono anche l'informazione che il portatore è talmente sano e dotato che può permettersi il lusso di sprecare energie per queste manifestazioni ed esporsi a predatori o altri pericoli. E possiamo anche dire che fino a poche centinaia di anni fa queste regole valevano anche nella specie Homo Sapiens, ma l'evoluzione culturale con il suo sviluppo tecnologico esponenziale, ben visibile negli ultimi duecento anni, ha profondamente modificato la situazione. La prestanza fisica e l'armonia corporea che trasmettono salute, sempre più simulabili con interventi di chirurgia estetica e con belletti, non sono più così rilevanti nella selezione sessuale umana, perché la tecnologia provvede alla sopravvivenza e alla procreazione anche dei meno dotati, e l'ostentazione di ricchezza e rango non implica più necessariamente la reale capacità di procurarseli. Sicuramente questa evenienza riduce la pressione evolutiva della specie sapiens verso un miglioramento dell'adattamento, e riduce anche le caratteristiche del dimorfismo sessuale. Si ha la sensazione che l'evoluzione culturale domini ormai il processo evolutivo umano. La cultura dilagante e quasi ossessiva dell'uguaglianza sessuale, le *quote rosa*, le tecniche d'inseminazione artificiale o di prevenzione della gravidanza, la crescente accettazione sociale dell'omosessualità e i modelli estetici androgini proposti, la cute glabra ecc., sono segni inequivocabili che l'evoluzione culturale vuole relegare la sessualità ad un piacere edonistico (pur sempre da perseguire!) piuttosto che ad un meccanismo procreativo selettivo, come del resto per i più fortunati è già avvenuto per procurarsi il cibo e per l'attività fisica (sport).

Cosa ci riserva il futuro? Difficile dirlo, ma, se e quando la tecnologia consentirà la gestazione sicura e vantaggiosa fuori dal corpo femminile (come insetti, molluschi, anfibi e uccelli fanno già da milioni di

anni) e sarà possibile la fecondazione artificiale in provetta fra due genomi non necessariamente di generi diversi, è probabile che la distinzione in generi nell'Homo Sapiens sparisca. Insomma ci si prospetta un futuro da… lumache. Che tristezza: da primati a molluschi!

Coevoluzione

Abbiamo già detto che la presenza di più specie contemporaneamente nello stesso ambiente produce una indistricabile quantità d'interazioni con competizioni e cooperazioni. A proposito di queste ultime, gli esempi più citati sono quelli tra insetti impollinatori e fiori, o del pesce pagliaccio e l'anemone, chiaramente coevoluti nella loro forma fisica e comportamento. Già Darwin nel suo viaggio intorno all'America del sud aveva notato lo strano aspetto di un fiore esotico ed aveva ipotizzato la presenza di un insetto con un apparato succhiatore dedicato che potesse accedere al nettare nascosto, e questo insetto è stato realmente scoperto decenni dopo la morte di Darwin. Ma altri esempi di coevoluzione sono stati dimostrati anche all'interno di molte cellule. È ormai assodato che cloroplasti e mitocondri, corpuscoli ora dedicati a trasformazioni energetiche per la cellula, un tempo organismi autonomi con rispettivo genoma, siano stati successivamente inglobati in cellule ospiti, e in queste ora cooperino per la sopravvivenza di entrambi. Ma altri aspetti di coevoluzione sono comparsi grazie a meccanismi culturali anche nella specie Sapiens. L'agricoltura e la pastorizia (allevamento del bestiame in genere) sono interpretabili come coevoluzione tra specie differenti. Attualmente 50 miliardi stimati di polli di allevamento contribuiscono al sostentamento alimentare di 7 miliardi di umani. I polli e gli umani sono aumentati esponenzialmente di numero nel pianeta, ma le loro vite non sembrano migliorate. Per i polli allevati le condizioni e la durata di vita di 7-8 mesi sono ben peggiori della vita selvatica potenzialmente di 5-7 anni. Ed anche la vita dei pollicoltori non è molto divertente, dovendo questi costantemente provvedere al nutrimento, sorveglianza e pulizia dell'ambiente della polleria, oltre ad essere spesso esposti a patologie trasmesse dai polli (Influenza Aviaria). C'è da discutere se i Sapiens abbiano domesticato i polli o viceversa, visto che la specie polli è quasi decuplicata rispetto alla specie sapiens. Noah Harari provocatoriamente afferma che, in agricoltura, i cereali hanno domesticato l'uomo e non viceversa, anche qui mettendo in evidenza che la vita dei primi agricoltori era molto peggiore dei primitivi cacciatori e raccoglitori: più fatica tutti i giorni, più esposizione a malattie ed epidemie per la densità di popolazione e la promiscuità con animali, più incertezza della produzione alimentare (carestie), meno variabilità di cibo con peggioramento del sistema immunitario. Tutto questo in cambio di un incremento demografico per la maggiore disponibilità di cibo (carestie a parte). Insomma sembra che l'allevamento di altre specie sia una trappola per tutte le specie coinvolte, perché, in cambio di un aumento della numerosità delle rispettive popolazioni, i singoli individui vivono peggio. Ma, come dice Dawkins, "ai geni egoisti interessa solo la propria diffusione, non la felicità dell'individuo che li riproduce".

9. LUCI E SUONI

Ma quali luci e suoni! Il mondo è buio e silenzioso se nessuno è presente. *Luci* e *suoni* sono una conseguenza dell'evoluzione biologica: sono le *sensazioni* prodotte, rispettivamente, da radiazioni elettromagnetiche con certe frequenze e da onde di compressione-rarefazione dell'aria con certe frequenze, che incidono su alcune strutture biologiche rese atte dall'evoluzione a convertirle in potenziali elettrochimici variabili all'interno del sistema nervoso.

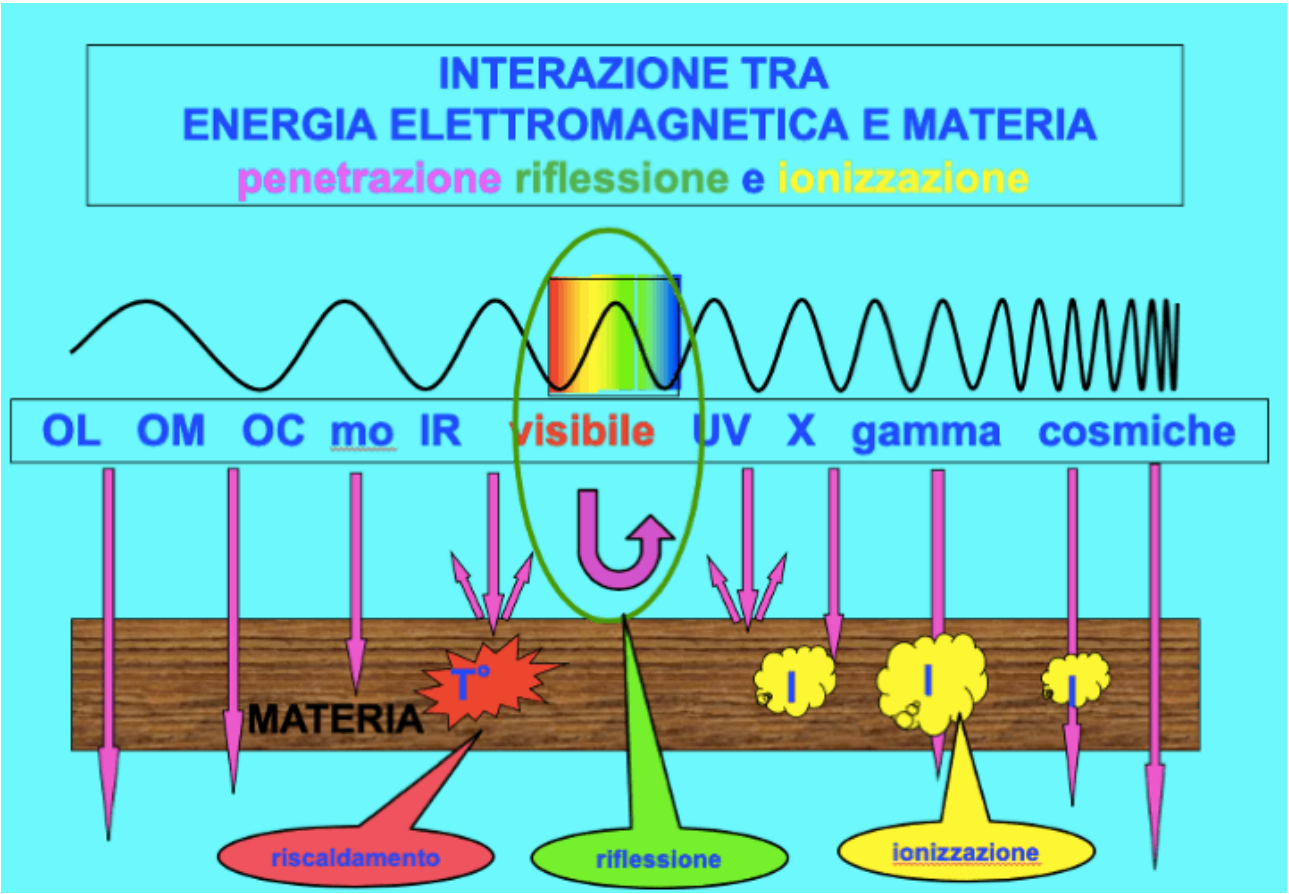


Fig. 9. Interazione tra radiazioni elettromagnetiche e materia. Le frecce viola rappresentano il grado di penetrazione nella materia solida con i relativi effetti.

Evidentemente è stato molto utile, evolutivamente parlando, allestire sensori adeguati a questi fenomeni fisici per permettere l'esplorazione dell'ambiente. Non è un caso che i sensori visivi (recettori retinici), in tutti gli animali provvisti di visione, siano sensibili solo ad una ristretta banda di radiazioni

elettromagnetiche, quella che appunto abbiamo definito *luce*. Il motivo è che questa banda tra 350 e 700 nm viene fortemente riflessa dalla materia solida, e quindi un sensore sintonizzato su queste frequenze può percepire, per riflessione, il massimo numero di ostacoli, pericoli e nutrienti a distanza (Fig. 9). Un sensore per altre bande, ad es. per i raggi X, servirebbe a ben poco, perché molti oggetti sono facilmente attraversati da queste radiazioni e risulterebbero pertanto non percepibili.

Si fa ancora più fatica ad accettare di conseguenza che anche i colori non esistono là fuori. Essi sono una codifica percettiva della recezione di particolari lunghezze d'onda elettromagnetica. Il *colore* è come il *dolore*: un'interpretazione soggettiva e personale di eventi fisici mediata dal sistema nervoso. Nessuno si sogna di dire che il dolore è sullo spillo che punge, e non nel cervello che lo percepisce; così, il colore della rosa che guardo non è sul fiore, ma nel mio cervello.

Intendiamoci: non che nel cervello ci sia il colore rosa: c'è una configurazione di attivazioni di gruppi di neuroni nelle regioni corticali occipitali (area V4) che rappresenta il colore rosa. Ed ancora meno intuitivo è il fatto che questa rappresentazione, quando trasmessa alle cortecce prefrontali, provochi la percezione cosciente "vedo una rosa là fuori".

Tutte le specie sono evidentemente equipaggiate con sensori adeguati alle loro dimensioni e capacità interattive con l'ambiente, con il risultato che per ognuna di esse l'ambiente appare diverso. La nostra immagine del mondo non è assolutamente comparabile a quella di un insetto che vede l'ultravioletto o a quella di un cane che vede pochi colori ma ha una percezione olfattiva per noi inimmaginabile, per non parlare di un pipistrello o un delfino che esplora l'ambiente non con la vista ma con emissione di ultrasuoni.

Bioacustica: questa disciplina nata qualche decennio fa ci ha mostrato che il nostro udito ha davvero un range di frequenze limitato rispetto all'ampio spettro di frequenze naturali e biologiche che ci avvolge e ci ha fatto capire che l'esplorazione e la comunicazione acustica è patrimonio di moltissime specie, dalle balene ed elefanti alle zanzare e altri insetti … anche i pesci "parlano" chi lo avrebbe pensato 50 anni fa! (K. Bakker, "i suoni segreti della natura")

10. L'ALTRO REPLICANTE

L'accumulazione di esperienze sull'ambiente nel corso della storia dell'uomo ha manifestato un andamento esponenziale ben visibile negli ultimi due-trecento anni, ed ha prodotto un numero enorme di credenze, più o meno utili sul piano pratico. Alcune di queste credenze sono state definite *conoscenze* e alcune più specificatamente *leggi fisiche* per un carattere di apparente universalità e stabilità, e tra queste una delle più solide appare essere il già menzionato secondo principio della termodinamica, secondo il quale qualunque sistema isolato prima o poi va incontro ad una morte termica: l'entropia aumenta inesorabilmente.

In realtà non sembra esistere verifica esaustiva di questa affermazione. Infatti una dimostrazione matematica non è una verifica sperimentale, perché la matematica non è una scienza sperimentale, è un linguaggio molto preciso; la fisica lo è, ma la fisica non dimostra, colleziona esperienze e propone *leggi* molto probabili (alla nostra scala di osservazione). È quindi *probabilmente* vero che esista una tendenza generale all'aumento di entropia nell'universo; ma l'evidenza indica che esistono anche forti tendenze locali in direzione opposta, verosimilmente pagate da un maggiore aumento di entropia altrove, con un bilancio, ipotizzato per ora, sempre a favore di quest'ultima. Bilanciati o meno, esistono fenomeni neg-entropici (auto-organizzanti) ovunque.

Alla scala delle nostre osservazioni, eventualmente potenziate da dispositivi tecnologici, affermiamo che la forma irregolare di una pietra, regolare di un cristallo, variabile di un liquido, plastica di una foglia, è dovuta alla natura dei legami atomici e molecolari in gioco, cioè a regole locali. In biologia il concetto di forma è importante, perché implica e condiziona l'interazione con l'ambiente e quindi con altre forme, e pertanto influenza la funzione. A livello modellistico matematico sono state identificate equazioni in grado di generare strutture bi– e tridimensionali anche molto articolate e somiglianti a strutture biologiche in base a semplici regole di vicinanza dei componenti della trama (automi cellulari, https://it.wikipedia.org/wiki/Automa_cellulare) (Fig. 10).

Un quesito importante sorge quando ci si domanda ove siano contenute le regole che condizionano la forma di un artefatto biologico esterno all'organismo (*fenotipo esteso*): la tela del ragno, la diga del castoro, ecc. Sembra che la capacità di costruzione di tali strutture sia codificata in una sequenza molecolare collocata in luoghi assai distanti dall'artefatto stesso: nel DNA delle cellule germinali del ragno o del castoro costruttore. Ma, come si è detto a proposito delle qualità emergenti, non è corretto pensare che tali strutture siano totalmente definite dalle sequenze DNA che ne costituiscono la *ricetta*. È l'interazione di queste con l'ambiente e con altre strutture già formate dell'individuo a produrne la forma definitiva e quindi la funzione (Epigenetica). Esattamente come la ricetta di una torta scritta su

di un libro produce torte più o meno buone in funzione della qualità e dose degli ingredienti usati e della variabilità della procedura (tempi, temperatura, umidità e igiene) quando la ricetta viene eseguita.

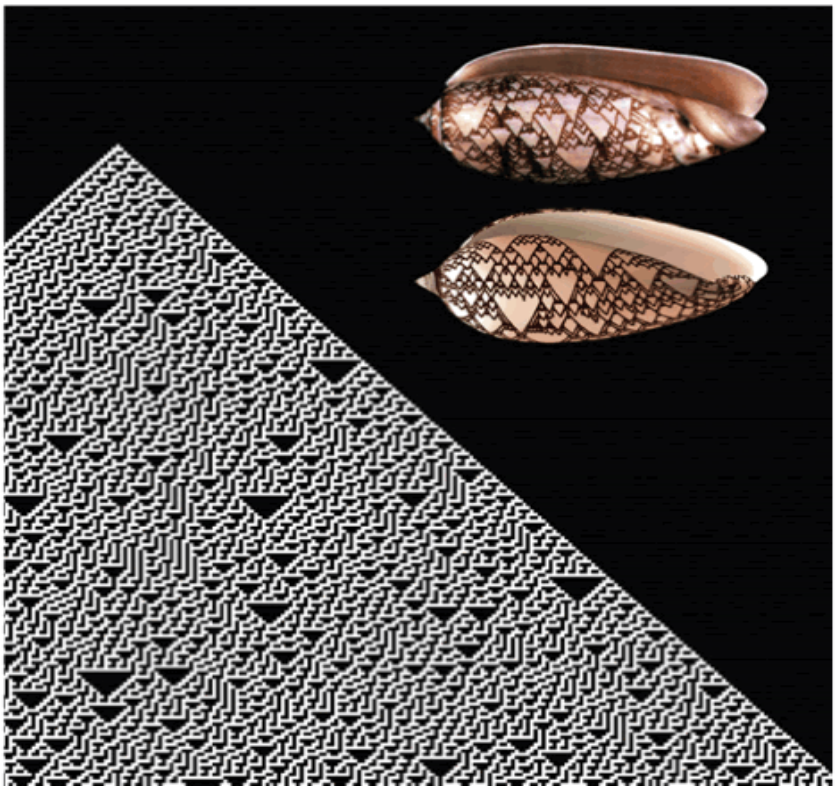


Fig. 10. Automa cellulare che riproduce il disegno sulla superfice della conchiglia (conus).

Epigenetica è una parola coniata nella metà dello scorso secolo per definire la progressiva differenziazione cellulare durante la morfogenesi (la formazione del corpo in gestazione) in base alla constatazione che tutte le cellule che si riproducono all'interno dell'individuo hanno lo stesso codice genetico *individuale* (DNA) ma acquisiscono forma e funzioni molto diverse *in relazione alla zona del corpo* ove vengono trovarsi (cute, fegato cervello etc.) che evidentemente modifica l'espressione di alcuni loro geni. Ed anche per spiegare la variabilità individuale fenotipica di organismi geneticamente identici, come avviene nei gemelli monozigoti, perché necessariamente l'interazione con l'ambiente dei singoli costituenti cellulari è diversa già in fase gestazionale e continua a manifestarsi nel procedere con l'età riducendo progressivamente la similitudine del loro aspetto corporeo ed anche comportamentale.

Negli ultimi anni sono stati studiati con meticolosità gli effetti dell'alimentazione neonatale negli insetti e nei topi. Nelle api, ad esempio, si è capito che la regina è tale solo perché viene sempre nutrita con *pappa reale* che provoca una inibizione di alcuni geni e questo ne modifica la forma, il comportamento e la rende fertile, unica nell'alveare, a differenza di tutte le sue sorelle gemelle non fertili che condividono l'identico DNA ma che sono state nutrite diversamente. Ma c'è di più si comincia a

sospettare che queste variazioni fenotipiche individuali, in alcuni casi possano essere trasmesse alla discendenza al di fuori del DNA e ripresentarsi per un certo numero di generazioni.

Ad esempio topi allevati in regime alimentare molto povero generavano prole di minori dimensioni ma comunque sana e longeva. Ma se la nuova generazione era riportata a regime alimentare normale sviluppava facilmente obesità e diabete con riduzione della durata di vita. Come se una variazione epigenetica li avesse preparati ad un ambiente con minore disponibilità di cibo e fossero non più adatti ad una alimentazione normale. Esistono anche conferme analoghe nel genere umano in popolazioni che hanno sofferto importanti e durature carestie durante la gestazione. (in Olanda durante l'ultima guerra).

Il fatto che queste *variazioni fenotipiche possano essere trasmesse* e siano comunque di breve durata (poche generazioni) potrebbe far pensare che sia un utile meccanismo evolutivo per fronteggiare velocemente cambiamenti ambientali che la più lenta modificazione selettiva naturale del DNA non riuscirebbe certamente a cogliere in **una sola** generazione. Sarebbe una sorta di memoria a breve termine di alcune condizioni di vita, utile per aumentare la probabilità di sopravvivenza delle generazioni future se si trovassero nelle stesse condizioni dei genitori.

Come dire: cure parentali automatiche preventive!

Queste considerazioni sono ormai codificate nella sintesi moderna della teoria Darwiniana che prende anche il nome di EVO-DEVO (Evolutionary Developmental Biology).

La trasmissione di informazioni tra viventi è sicuramente coeva con la loro comparsa sul pianeta. Tutti i viventi anche gli organismi unicellulari e le piante possono "trasmettere" automaticamente la loro presenza nell'ambiente con la secrezione di particolari molecole che possono essere riconosciute da altri viventi ma questa è una comunicazione automatica e non simbolica, quest'ultima invece compare in animali evoluti con espressioni comportamentali, atteggiamenti corporei, mimica e segnali acustici.

Ma per una comunicazione specifica e intenzionale bisogna aspettare l'evoluzione del linguaggio vero e proprio.

Il *linguaggio è un istinto*, il tipo di lingua è una modalità appresa spontaneamente per imitazione subito dopo la nascita. Come dire il cervello umano è attrezzato per trasmettere stati d'animo, fatti, oggetti con un *simbolismo* vocale specifico che viene appreso dall'ambiente sociale nel quale è immesso. Altro è la *scrittura,* una *abilità* appresa più o meno volontariamente che trasforma il simbolo vocale in simbolo grafico.

Il linguaggio umano (probabilmente comparso circa 150.000 anni fa con la nostra specie Sapiens) è un'evoluzione dell'espressione acustica che molti animali hanno per trasmettere emozioni contestuali (paura, dolore, eccitamento sessuale etc.) e anche fatti ambientali contestuali rilevanti per la specie (pericoli, presenza di cibo o acqua) e che oggi sono definiti segnali referenziali (scimmie, balene e pipistrelli).

La scrittura comparsa circa 5000 anni fa' è un'evoluzione del disegno/ pittura (comparsi forse nella specie Neanderthal molto prima di noi) e come si è detto è un simbolismo grafico appreso che consente la comunicazione a distanza nel tempo e nello spazio.

Si potrebbe quindi dire che *l'informazione volontaria* sia comparsa con la trasmissione simbolica vocale di eventi o fatti, inevitabilmente locale ed evanescente, ma l'elemento che ha permesso la sua diffusione esponenziale nel pianeta è stata la trasformazione del disegno/pittura di oggetti e animali su materiali trasmissibili nello spazio e tempo, in **scrittura**, perché questa ha permesso di rappresentare simbolicamente anche *suoni* e quindi successivamente *parole* e *idee.*

Dawkins propone che l'evoluzione culturale sia dipendente da replicanti mentali analoghi ai geni biologici, per i quali ha coniato il termine **memi**; e che questi siano sottoposti a leggi di replicazione, variazione, e selezione ambientale analoghe a quelle valide per i geni, e che come questi tendano a saturare il loro ambiente, che nel loro caso è la cultura umana. **Il meme è un replicante <u>simbolico</u> della cultura.**

Questa ipotesi suggestiva e provocatoria (R. Dawkins, "Il Gene Egoista") esprime forse la posizione più antitetica all'antropocentrismo dei secoli passati. Secondo essa non solo non siamo il centro dell'universo, ma siamo solo efficienti macchine utili alla replicazione dei geni, e forse alla replicazione dei memi, altrettanto egoisti, con il vantaggio, per questi ultimi, di non subire le limitazioni spazio-temporali alla loro propagazione tipiche dei geni. L'invenzione di un meme o la variazione di uno già esistente può essere propagata collateralmente nella stessa generazione di umani. Questa modalità assomiglia al continuo scambio di parti del genoma che avviene tra batteri della stessa specie indipendentemente dalla loro riproduzione, e che li rende rapidamente adattivi al mutare delle condizioni ambientali (es. resistenza agli antibiotici). Un ulteriore vantaggio dei memi rispetto ai loro omologhi biologici è il fatto di poter modificare non a caso, ma finalisticamente, la loro costituzione mediante l'immaginazione degli effetti delle variazioni introdotte. Insomma qui il progetto c'è, ed è modificabile anche prima o in corso della sua realizzazione prevedendone gli effetti.

Secondo Blakemore la presenza di questo secondo replicatore egoista, per le dette capacità replicatorie rapide e omnidirezionali, costituisce addirittura la spinta evolutiva principale, assieme alle capacità manipolatorie, verso lo sviluppo di cervelli sempre più grandi e complessi. Indubbiamente le velocità reattive e diffusive dei memi, incomparabilmente superiori a quelle dei geni, modificando rapidamente l'ambiente culturale possono orientare pesantemente la più lenta evoluzione genetica. Uno dei tanti esempi può essere quello della permanenza genetica dell'enzima *lattasi* in buona parte della popolazione adulta di quelle popolazioni che hanno mantenuto l'abitudine (memetica) ad assumere da adulti latte e derivati nella loro dieta quotidiana.

Quindi, due replicanti sul pianeta:

Organici: DNA – GENE. Necessitano di organismi biologici (cellule, corpo).

Culturali: SIMBOLI – MEME Necessitano di sistemi mentali evoluti.

Intendiamoci il MEME non è un replicante alieno innestatosi accidentalmente nel nostro DNA, è un elemento che fa parte dei processi evolutivi che gradualmente modificano tutte le specie per morfologia (forma) e comportamento. Dunque quale può essere l'origine del MEME? è un'evoluzione dell'apprendimento fenotipico che da riflesso condizionato classico (Pavlov) del tutto automatico basato sulla tripletta (sensorialità personale iniziale-azione-sensorialità conseguente), è passato ad un apprendimento per imitazione, anch'esso automatico. La sensorialità personale iniziale può essere la stessa, ma l'azione e la sensorialità conseguente non sono più personali ma sono percepiti come eventi esterni.

Un esempio: ho già appreso che se assaggio un frutto sconosciuto, e la mia sensorialità conseguente è *amaro/acido,* il frutto non è edibile e va evitato ma ora se vedo un individuo, anche di altra specie, avere un comportamento simile apprendo che quel frutto non è edibile. Ho esteso automaticamente l'apprendimento di un riflesso condizionato ad una azione e sensorialità altrui osservate (un evento ambientale). Questo si può considerare già un prototipo di MEME, è una conoscenza personale indiretta di fatti nell'ambiente. Diventerà un MEME a tutti gli effetti quando sarà simbolicamente trasmissibile con linguaggio, grafica e scrittura.

Il potere del meme

La comunicazione simbolica intenzionale, in particolare il linguaggio, è un prodotto evolutivo che differenzia drasticamente la specie Homo Sapiens da tutti gli altri viventi ed evidentemente si è radicato e diffuso per i notevoli vantaggi che produce. Il comportamento del singolo individuo non è più pilotato solo dalla propria percezione ambientale, ma anche dalle informazioni trasmesse dalla comunità, utili o meno (sicuramente soprattutto quelle utili, nelle piccole comunità primitive). È comprensibile che l'utilità di un'informazione tenda a rinforzare l'importanza dell'informazione e le sue modalità di trasmissione. Apparentemente non sembra comprensibile la diffusione di memi non verificabili nella loro utilità, quali ad esempio i miti e i dogmi; ma se questi frenano comportamenti esplorativi che possono generare rischi, ribellione o ansia, e quindi intralcio a comportamenti produttivi, e invece mostrano proprietà ansiolitiche, protettive nei confronti delle avversità ambientali e per le capacità aggregative (il senso di appartenenza ad un gruppo) migliorano la cooperazione tra una moltitudine d'individui altrimenti belligeranti, allora tendono a diffondersi e perpetuarsi, perché evidentemente nella maggioranza della popolazione umana risultano utili (attenzione: utili, non veri!). Nelle religioni più diffuse, poi, l'invenzione geniale del meme di una divinità e di un'esistenza post mortem, con il corollario del premio/punizione risultante dal comportamento in vita, costituisce tuttora un potentissimo mezzo auto-diffusivo e utile agli individui dominanti per il controllo dei sottoposti. Insomma l'evoluzione ha creato Dio, e non viceversa, perché evidentemente *in media* questo meme resistente è risultato più utile che dannoso…… finora! Ma con l'aumento della popolazione mondiale, l'aumento della comunicazione e degli spostamenti individuali e di gruppo sembra che questa utilità venga meno ed anzi provochi conflitti sempre più rilevanti. Qualcuno potrebbe dire che è solo una fase transitoria di *lotta* tra memi che finirà con la vittoria del più potente….. non con la cancellazione di entrambi purtroppo!

L'invenzione dei miti

Senza una modalità di comunicazione efficiente i gruppi di ominidi non superavano le poche decine d'individui cooperanti. La comparsa dei primi linguaggi ha esteso la dimensione dei gruppi a 150-200 individui, ma oltre questo numero anche una comunicazione efficace con un linguaggio ben articolato non riesce a mantenere il gruppo unito e collaborante, a causa dell'aumento d'incompatibilità tra individui, dell'aggressività, delle gelosie, delle progettualità differenti. Cosa ha permesso la formazione di città con migliaia e poi milioni d'individui, e di nazioni? L'invenzione di miti, inizialmente religiosi, successivamente militari, politici ed economici. Concetti del tutto inventati, come divinità, patria, partiti politici, società per azioni, riescono a far cooperare numeri incredibili d'individui. La costruzione delle piramidi e l'espansione dell'Impero Romano non sarebbero stati possibili senza l'aggregazione religiosa e politica. L'esempio della Peugeot di Noah Hararari è illuminante: la Peugeot non esiste materialmente, esistono molte fabbriche disseminate nel pianeta che forniscono materiali, componenti, parti, che permettono l'assemblaggio delle auto; esistono migliaia d'individui che lavorano per questo, operai, tecnici, amministrativi, tutti convinti a cooperare da un altro mito ora indispensabile e transnazionale, il denaro. Sicuramente tutti i lavoratori attuali sono diversi da quelli che hanno iniziato la produzione cento anni fa, e anche se sparissero tutti e la produzione si fermasse la Società Peugeot potrebbe sopravvivere aspettando che un nuovo gruppo d'individui ne rilevi il marchio (come infatti è recentemente successo). Miti su miti, questa è la *colla memetica* che consente all'umanità di prevalere, nel bene e nel male, su un ambiente ostile.

Un analogo di questa colla nel mondo degli insetti sociali è la *comunicazione ferormonale*. In specie sociale stabili i meccanismi comunicativi ferormonali possono rimanere invariati per tutta la durata della specie, ma in una società instabile come quella umana la comunicazione memetica tramite miti non può rimanere stabile, proprio per la rapida capacità diffusiva dei miti verso nuove collettività. L'Impero Romano non sarebbe esistito se non fosse stata accettata la coesistenza o addirittura il sincretismo delle religioni di tutti i territori assoggettati, oltre all'invenzione del mito della partecipazione all'Impero Romano. L'attuale globalizzazione della comunicazione è nata ed è possibile sulla base di altri miti economici e finanziari, e sarebbe bene che presto altri miti nazionali militari e religiosi, ora più dannosi che mai, sparissero o almeno raggiungessero anche loro un sincretismo. L'ONU era stato forse un buon inizio, anche se oggi è praticamente alla paralisi.

Il potere del meme si sta dimostrando enorme se pensate alla velocità e diffusione dei cambiamenti ambientali che sta producendo in questo pianeta e già timidamente al di fuori di questo. La capacità dei memi di pilotare e modificare il comportamento umano per certi versi assomiglia molto alla capacità di alcuni parassiti di modificare il comportamento dell'ospite in modo tale da renderlo facile pasto per altri ospiti che permetta la riproduzione dei parassiti stessi. Leggere le loro strategie comportamentali per la riproduzione fa inorridire (Fig. 11).

Fig. 11. *Leucochloridium sp.* infestante i peduncoli oculari di una Succineidae (freccia). Questa specie modifica il comportamento della lumaca ospite per renderla più facilmente predabile da ruminanti che cosi assicurano la diffusione del *Leucochloridium.*

Ci siamo illusi che il meme (la cultura) ci aiutasse a gestire e controllare l'ambiente, invece è lui a controllare il nostro comportamento. Con questo non vogliamo affermare che i memi siano tutti pericolosi parassiti virtuali; ma simbionti sì, almeno per ora.

Indubbiamente la triplicazione del volume cerebrale, che in poco più di tre milioni di anni ha trasformato dei primati ominidi in Homo Sapiens, è sbalorditiva. Se calcoliamo prudentemente una media di cinque – sette generazioni ogni cento anni, 150.000 generazioni ci separano da Lucy (forse il primo ominide, 3,5 milioni di anni fa), e meno di 2.500 (50.000 anni fa) dall'uomo di Neanderthal (anche se questo non sembra un nostro progenitore diretto, ma uno straniero imparentato).

Il gene, per quanto riconosciuto attualmente come la vera unità genetica, non è sempre identificabile come una sequenza di elementi chimici (nucleotidi) ben localizzata nella catena del DNA; e, anche se lo fosse, l'informazione è comunque nella sequenza dei nucleotidi che lo definiscono, non nella loro essenza fisica. Al pari delle lettere dell'alfabeto o degli 0 e 1 di un calcolatore digitale, non sono questi a costituire l'informazione, ma la loro sequenza ed organizzazione. Quindi si potrebbe affermare che **gene =meme = informazione**: ed è questa l'unità immateriale potenzialmente immortale che è sottoposta ad evoluzione darwiniana.

Da questo punto di vista una lattina di Coca-Cola sarebbe il risultato evolutivo di un sistema durato più di tre miliardi di anni con poderose spinte auto-organizzanti su questo pianeta (Fig. 12).

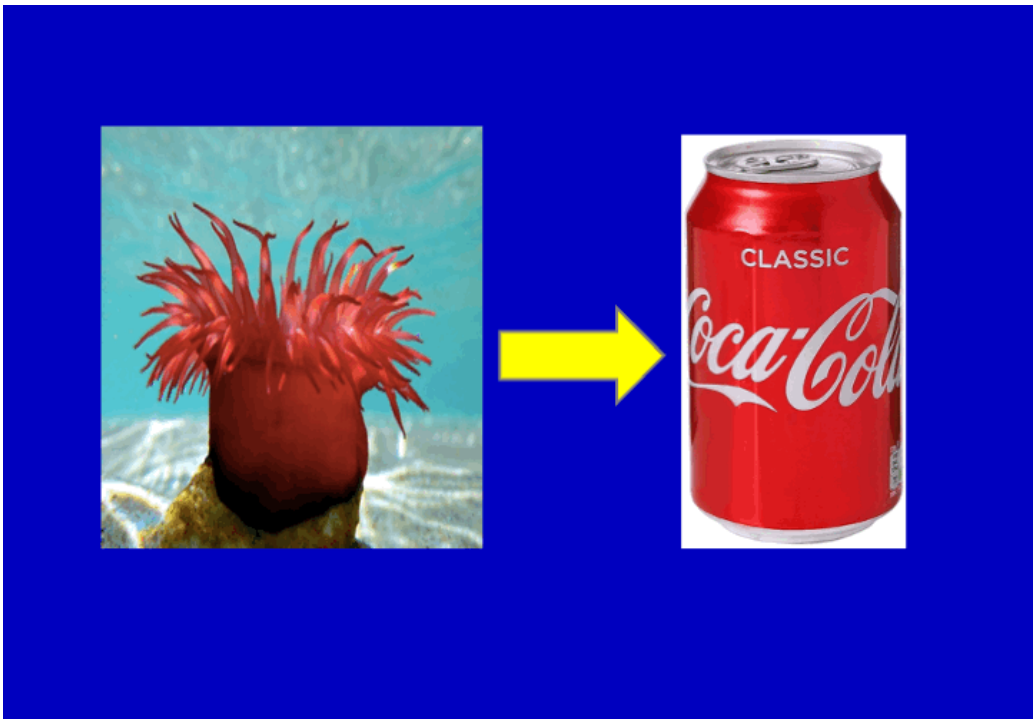


Fig. 12. Actinia equina → Coca-Cola. (purtroppo anche la seconda spesso sta in fondo al mare!)

In conclusione, sembra proprio che il principio organizzante neg–entropico non sia uno strano e irrilevante fenomeno occasionale in un mare in tempesta che va placandosi inesorabilmente (entropia), ma un potente motore che lo mantiene fortemente agitato; anzi, a giudicare dai pochi eventi che conosciamo, che localmente lo agita sempre di più.

Aumento di complessità (fino a quando?)

Questo progressivo aumento di complessità delle specie è prodotto da retroazioni positive (positive nel senso che gli effetti amplificano retroattivamente le cause che li hanno prodotti, il che non è necessariamente vantaggioso od utile: si pensi alla retroazione positiva che genera una esplosione atomica). In realtà in ogni istante lo stato di un sistema fisico dinamico è conseguenza del bilanciamento tra retroazioni positive, che porterebbero all'aumento esponenziale del fenomeno e poi al suo esaurimento in modo più o meno catastrofico, e retroazioni negative che tendono al contrario a stabilizzarlo, con oscillazioni più o meno evidenti. Dai dati che osserviamo l'evoluzione biologica sembra, per ora, dominata da retroazioni positive per quanto concerne l'aumento esponenziale di complessità delle specie osservato negli ultimi cinquecentomila anni. Anche se per il mantenimento in vita dei singoli individui sono necessari efficaci meccanismi retroattivi negativi con effetto stabilizzante.

Ma non sembra che il genoma umano si sia modificato molto negli ultimi 50.000 anni; il che vuol dire che l'uomo di allora e quello attuale nascono praticamente identici. Ma l'ambiente con il quale devono interagire si è profondamente modificato: un tempo naturale, adesso quasi totalmente artificiale per gran parte di noi. Inoltre la velocità del cambiamento dell'ambiente artificiale ha assunto un chiaro

aspetto esponenziale almeno negli ultimi due secoli. È quindi sorprendente che un cervello con un piano costruttivo adatto ad un ambiente naturale di 50.000 anni fa sia in grado di gestire (parte) della complessità del mondo artificiale attuale. La plasticità della corteccia è davvero notevole, ma la domanda è: fino a quando l'uomo saprà gestire la complessità crescente dell'ambiente che egli stesso produce?

Possono esserci varie risposte ipotetiche, delle quali alcune potrebbero essere le seguenti:

1. Ci sarà una flessione dell'aumento di complessità indotta dall'uomo nell'ambiente, ed una stabilizzazione come in ogni fenomeno che manifesti un andamento sigmoidale autolimitante.

2. L'Homo Sapiens si trasformerà in una specie completamente sociale, con competenze e comportamenti specifici forse geneticamente costruiti alla pari degli insetti sociali, api e formiche, con una suddivisione delle diverse modalità di gestione dell'ambiente (culturalmente è in parte già così).

3. Costruiremo protesi cognitive, alla pari di quelle fisiche (occhiali, protesi acustiche, esoscheletri) che ci consentiranno di gestire la complessità crescente. In effetti il personal computer e internet possono essere considerati primitive protesi cognitive.

4. Prima o poi l'evoluzione biologica non riuscirà a sostenere la complessità crescente richiesta dalla pressione evolutiva memetica, e allora questa potrebbe trovare altri vettori non necessariamente biologici (Marvin Minsky: "L'uomo è uno scalino intermedio fra la scimmia e il computer"), vedi avanti sui sistemi di Intelligenza Artificiale.

Sorprendentemente la comparsa dell'evoluzione culturale (memi), che pensiamo abbia contribuito all'evoluzione di cervelli sempre più efficienti in poche decine di migliaia di anni, sembra attualmente lavorare contro la replicazione dei geni e la loro evoluzione che finora ha utilizzato. Alcuni esempi:

- in prima linea i metodi contraccettivi, che riducono efficacemente l'espansione numerica della specie, e di conseguenza riducono la selezione naturale;

- le terapie mediche, e presto genomiche, che consentono il raggiungimento dell'età riproduttiva anche ad individui che non sarebbero sopravvissuti ad una selezione naturale;

- le accortezze igieniche e mediche, che allungano la vita ben oltre l'età riproduttiva sottraendo energie e risorse ai più giovani in fase riproduttiva.

Insomma, sembra proprio che il meme abbia più interesse a mantenere in vita il singolo fenotipo più a lungo possibile e ben oltre l'età riproduttiva. Si può scorgere la ragione di ciò nel fatto che la produzione e replicazione con variazioni dei memi (cultura) è indipendente dalla capacità riproduttiva biologica del singolo individuo, ed anzi probabilmente migliora con la sua esperienza fenotipica e quindi con il progredire dell'età, ed è questo che interessa al meme, egoista al pari del suo cugino biologico.

Radicalizzando*: i geni costruiscono giovani vigorosi, i memi favoriscono i vecchi saggi a scapito dei giovani, e l'ambiente, con tutti gli altri viventi, cerca di eliminare tutti quanti!* Bella lotta, vero?

Ma non ci sono vecchi se non ci sono prima i giovani. Questa competizione potrebbe quindi portare ad un'oscillazione nella costituzione della popolazione della specie Homo Sapiens tra giovani e vecchi, analogamente a quanto avviene tra due specie di prede e predatori (volpi e lepri nel noto esempio). Oppure gli ultimi arrivati, i memi, più aggressivi e veloci nell'evoluzione, potrebbero costruirsi altri vettori e replicatori artificiali diversi dall'uomo, con ritorno all'ipotesi n. 4 su detta.

Sono innegabili i vantaggi conservativi e procreativi che hanno spinto l'evoluzione a selezionare progressivamente comportamenti reattivi iniziando da riflessi innati fino al comportamento intenzionale e cosciente. Ma la conseguente comparsa del replicante culturale, il meme, fa supporre che il processo evolutivo continuerà esponenzialmente anche nel mondo artificiale forse addirittura rallentando, stabilizzando o addirittura invertendo l'aumento di complessità dell'evoluzione biologica su questo pianeta, come accade in molti processi sigmoidei. Permetteteci allora una divagazione cosmologica. Se l'ipotesi stupefacente di Paul Dirac fosse vera secondo la quale la comparsa dell'universo sarebbe originata dal "vuoto" (che vuoto, secondo lui, non è per la grande quantità di energia potenziale che contiene) e che il Big Bang avesse scatenato un incredibile processo autoorganizzativo della materia atomica appena comparsa, fino ad arrivare alla vita biologica cosciente, dovremmo considerare quest'ultima come una fase transitoria di un processo autocatalitico senza fine verso complessità inimmaginabili.

Meccanismi retroattivi di controllo della popolazione

Fino ad un paio di secoli fa i meccanismi selettivi dell'evoluzione biologica controllavano efficacemente l'incremento eccessivo della popolazione umana a livello locale (paesi e città) con malattie contagiose e carestie. I più deboli e meno adatti non sopravvivevano facilmente e quindi non si riproducevano: grande mortalità infantile e vita media sotto i 50 anni. Ma la prevalente sopravvivenza dei più adatti (più resistenti, intelligenti o astuti) ha favorito la comparsa e la diffusione di memi efficaci nel miglioramento delle condizioni di vita di tutti, con inevitabile conseguente riduzione dell'efficacia dei precedenti meccanismi selettivi biologici. Attualmente il meme, con l'aumento esponenziale della tecnologia e le sue ricadute sull'incremento demografico (10 miliardi di umani previsti nel 2050), fa sprecare troppe risorse del pianeta per la sopravvivenza di individui che la selezione naturale avrebbe eliminato, meno dotati o comunque non più in grado di generare per anzianità.

Ma qualche meccanismo memetico retroattivo autolimitante, simile alle pandemie dei secoli scorsi, forse sta penetrando nelle società troppo densamente popolate. La crescente difficoltà nella gestione delle relazioni internazionali e la sopravvivenza e prevalenza di imbecilli (non è un insulto, ma una diagnosi) nelle strutture dirigenziali delle società umane (Governi) sta già facendo i suoi danni, e tra poco probabilmente si potrebbe notare un *benefico* calo dell'incremento demografico per decisioni governative sbagliate. Sembra, anche qui, che la lotta tra gene e meme possa avere fasi alterne secondo le leggi basilari evolutive che fanno oscillare in antifase le popolazioni di prede e predatori in funzione

delle risorse ambientali. Ci spiace per noi e per le giovani generazioni attuali, ma forse sarà meglio per le future: ben vengano quindi ora i dirigenti imbecilli!

A pensarci bene il seme di questa competizione è comparso con l'invenzione memetica della democrazia, che è un metodo di controllo sociale assolutamente non fisiologico per i primati, e per quelli antropomorfi in particolare, nei quali evolutivamente il controllo è appannaggio dell'individuo *temporaneamente* alfa (un dittatore a tempo). Tuttavia la democrazia può ancora (malamente) funzionare quando, nella popolazione che la adotta, gli imbecilli sono minoritari. Ma quando, a causa delle invenzioni memetiche, la selezione naturale diventa meno efficace e gli imbecilli abbondano, diventa inevitabile che essi partecipino in numero sempre maggiore alle decisioni pubbliche, con le conseguenze che è facile immaginare e già constatare. La crescente possibilità poi di comunicare con sistemi informatici personali senza controllo alcuno di preparazione e veridicità (siti social) darà il colpo decisivo. Quando la democrazia sarà diretta, con referendum, che per una decisione utile richiederebbero competenze tecniche che pochi hanno, sarà inevitabile che provochi danni, probabilmente anche gravi.

L'effetto Flynn, la lenta salita del quoziente intellettivo (QI) medio delle popolazioni occidentali fino alla fine del precedente secolo, comincia a invertirsi. Nel primo decennio del 2000 in Francia si è verificata una riduzione di 3,8 punti del QI medio della popolazione, e analogamente in altri Paesi europei. Il motivo principale sembra essere dovuto al fatto che la parte della popolazione più intelligente, già minoritaria, fa meno figli dell'altra maggioritaria, ed è la prima volta che questo accade. E, come abbiamo detto, poiché la selezione naturale su Homo Sapiens ora non è più così efficace nell'eliminare i meno adatti, il QI della popolazione mondiale si riduce. Il film *Idiocracy* di una ventina di anni fa si sta avverando!

Non abbiamo neanche l'illusione che nel procedere dell'evoluzione culturale il pensiero fideistico possa attenuarsi, anzi, a guardare quello che accade nel mondo, il rischio è che questo meme prenda ancora più forza considerando l'inevitabile decremento dell'intelligenza umana prodotto adesso dall'incremento dell'intelligenza artificiale. Il *Grande Fratello* è già tra noi, e potrebbe diventare lui la prossima divinità con la quale, tra l'altro, si possono davvero fare richieste e ottenere risposte adeguate. Già accade che per decisioni importanti in ambito finanziario, militare, medico ed economico alcuni sistemi intelligenti *propongono* decisioni che per ora devono essere valutate da specialisti umani, ma presto *verranno prese autonomamente*, perché sicuramente migliori e più rapide, se non altro per l'enorme quantità di informazioni immediatamente disponibili per questi sistemi. Ma se smettiamo di prendere decisioni importanti, lentamente smetteremo di prendere anche quelle più semplici. Già adesso abbiamo delegato la guida dei nostri veicoli ai sistemi GPS, e molti giovani non hanno imparato consultare una mappa. E pensare che uno studio di una ventina di anni fa sui tassisti inglesi aveva appurato che avevano espanso alcune aree corticali cerebrali per mappare meglio la città rispetto comuni cittadini. Forse finché sapremo fare domande sensate questi sistemi saranno di grande utilità, ma quando non saremo più in grado di farle? perché tra poco ci capiterà di chiedere: "Prendo un caffè o un the? Cosa è meglio per me? Fammi chiedere al Grande Fratello che ho in tasca". Non c'è molto da scherzare, siamo molto prossimi a questa situazione, e quel che è peggio è che questo processo non si può fermare: la storia insegna che se qualcosa si può fare, qualunque cosa, prima o poi qualcuno la farà.

È inevitabile, il nostro futuro è orientato ad una schiavitù dorata, e di conseguenza ad un decadimento cognitivo progressivo i cui preliminari già s'intravedono, che piaccia o meno.

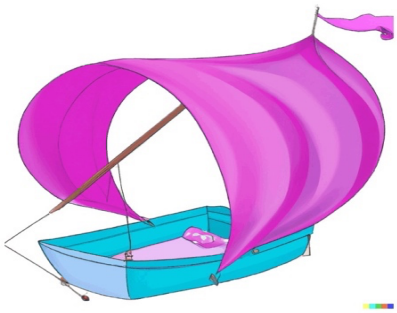
E si è già definito un termine per questo: **Demenza Digitale**. E come diceva Spitzer nel 2012 per quanto riguarda i computer inseriti nella scuola dei primi anni "*i computer sono macchine per ostacolare l'apprendimento*". È chiaro a molti che la didattica scolastica del secolo scorso non è applicabile in questo secolo, ma come fare? come si fa ad insegnare l'aritmetica ad un bambino di 6-7 anni che sa già perfettamente maneggiare la calcolatrice del suo cellulare e che quasi sicuramente non farà mai una addizione o divisione a tre cifre su di un foglio di carta nella sua vita! Forse bisognerà insegnare per **obiettivi,** utilizzando contemporaneamente discipline diverse, e cercando di sollecitare la curiosità, la collaborazione e la competizione come in alcuni videogiochi, ma certo non sarà un compito facile.

Qualcuno avrà già sentito dei progressi incredibili dei sistemi AI di tipo OPENAI (chatGPT) che risponde a domande formulate con linguaggio *colloquiale* fornendo spiegazioni molto dettagliate anch'esse in modo colloquiale. Questi sistemi sono ampiamente superiori agli *assistenti digitali* (google, siri, alexa) che già da tempo ci orientano nelle nostre ricerche sul web, questi nuovi sistemi si basano su di un bagaglio di informazioni che si misurano in parecchi miliardi di parole (in continua crescita) e sono in grado non solo di spiegare in modo molto esauriente quanto viene richiesto, ma anche di proporre soluzioni articolate a qualunque problema venga posto, e gratuitamente o quasi per ora! Come avere un esperto di ogni cosa, disponibile a rispondere immediatamente con linguaggio chiaro e comprensibile. Tutti contenti? No, perché oltre al fatto che tenderemo ad usare sempre meno la nostra memoria e il nostro pensiero, ci sono aspetti negativi ancora più preoccupanti. Questi sistemi non hanno un corpo fisico e non sono evoluti da sistemi prima reattivi, poi emotivi, poi percettivi e infine coscienti, come ha fatto l'evoluzione nel mondo biologico, e quindi la loro intelligenza non è affatto simile a quella umana se pur dimostrino capacità intellettive e descrittive che nessun umano riuscirebbe ad eguagliare. È una **abilità**, un "saper fare" non biologico, non hanno memoria personale, né comprensione di quanto producono, non utilizzano retroazioni dirette della loro produzione (finora!), funzionano con algoritmi probabilistici che costruiscono un ottimo testo inserendo e collegando le parole, in funzione della loro migliore probabilità, in base a quello che hanno appena scritto (le cose sono un po' più complicate ma la sostanza è questa). Se provate a domandare *loro* cosa siano i riflessi, le emozioni, le percezioni e la coscienza ne danno una descrizione scientifica aggiornata ed accuratissima ma non hanno la *percezione* di cosa significhi dolore, piacere, felicità etc. e lo precisano anche, quindi se demandiamo loro decisioni rilevanti su questioni che possono comportare implicazioni etiche sugli umani non dovremmo rimanere troppo tranquilli! Questi sistemi non possono mostrare un comportamento etico se non sono in grado di percepirlo.

Nella inevitabilità di un crescente utilizzo di questi sistemi artificiali proponiamo, nelle conclusioni di questo libro, un processo evolutivo per queste macchine che potrebbe *forse* ridurre la loro pericolosità.

Altri sistemi di *Generative AI* sono in grado di generare *nuovi* contenuti (musica, immagini, letteratura etc) sulla base di descrizioni colloquiali di testo. Alcuni sono apparentemente innocui e divertenti come Dall e-2 che *costruisce* immagini seguendo le indicazioni espresse con linguaggio colloquiale (text to image).

Esempio:” disegna un letto volante con una vela”



Questa è una risposta 5 secondi dopo.

Non cercano immagini adatte in rete, le *costruiscono* sulla base delle richieste! Quindi, quando tra pochissimo sarà possibile ordinare la stampa 3D di un qualunque oggetto venga in mente senza muovere un dito per progettarlo e tantomeno costruirlo, avremo perso oltre alla facoltà di memorizzare e di progettare anche quella di costruire, e senza cervello e senza destrezza manuale saremo solo una pancia da riempire. Proprio a proposito di questo c’è già una applicazione scaricabile su cellulari che chiede di scattare una fotografia del contenuto attuale del vostro frigorifero e in meno di un secondo l’AI vi propone alcune ricette che si possono realizzare con gli alimenti che compaiono nell’immagine! Non dovete neanche richiedere ai poveri neuroni prefrontali rimasti di attivarsi per produrre un semplice pensiero del tipo: ”**vedo** due uova..... le **faccio** sode “.

Che razza di vita ci stiamo costruendo?

L’allarme sulla pericolosità degli sviluppi di sistemi AI è già diffuso in rete e si sono già aperte Commissioni per circoscriverne le applicazioni e l’evoluzione, ma abbiamo già detto che se una cosa si può fare inevitabilmente prima o poi qualcuno la farà, indipendentemente dagli effetti positivi o negativi che può produrre sul pianeta. Per fermare AI bisognerebbe spegnere INTERNET ma questo farebbe crollare istantaneamente l’economia mondiale, tutte le dinamiche del mondo attuale sono dipendenti da internet, un reset a 50 anni fa non è materialmente possibile. Siamo di fronte ad un cambiamento inarrestabile

Certamente non siamo soli nell’immensità dell’universo, ci saranno civiltà più avanzate di noi di 1.000, 10.000, o 100.000 anni, come avranno affrontato questo problema? perché sicuramente lo avranno incontrato, l’evoluzione si manifesta ovunque. O forse le specie pensanti biologiche hanno una breve durata e vengono inesorabilmente sostituite dalle specie pensanti artificiali innescate da loro stesse? Potrebbe essere davvero così; sul nostro pianeta le specie più antiche e più *semplici* durano a lungo (funghi, piante, molluschi, insetti, pesci…..) mentre quelle più recenti e complesse (uccelli e mammiferi) molto meno, e noi siamo gli ultimi arrivati, più invasivi e meno stabili.

Il passaggio da un'intelligenza biologica ad un'intelligenza artificiale, quando avverrà, sarà una triste vittoria del meme sul gene perché l'evoluzione biologica elimina inesorabilmente quello che costa e non serve, quindi la nostra *mente* non più utilizzata sparirà…. e quindi noi stessi!

***Intelligenza artificiale* e *demenza digitale:* due processi evolutivi collegati e inevitabilmente in aumento. Carpe diem!**

Quale futuro

Il meme, la cultura espressa simbolicamente, in simbiosi con il gene ha permesso la rapida diffusione della nostra specie tramite la modificazione dell'ambiente e del comportamento umano stesso. Si può datare questo cambiamento con la comparsa dell'agricoltura e pastorizia circa 10000 anni fa, anche se le prime pitture rupestri risalgono ad alcune decine di migliaia di anni prima, e fino a qualche decennio fa questa simbiosi ha funzionato molto bene migliorando la qualità della vita e allungandola in gran parte della popolazione mondiale, ma ora sta accadendo qualcosa di negativo; la popolazione mondiale sta crescendo esponenzialmente negli ultimi 50 anni e le risorse planetarie si stima non saranno sufficienti per mantenere questo tasso di crescita, ma quello che è peggio e che finora le modificazioni ambientali e culturali erano sufficientemente lente in modo che il comportamento umano riusciva ad adeguarsi ad esse nell'ambito della stessa generazione o nella successiva, ma ora i cambiamenti sono così rapidi e con velocità in aumento che le generazioni non tengono più il passo. In altri termini il meme sta cambiando ospite! Che non sembra più un gene biologico ma un gene artificiale (informatico).

11. AUTO-ORGANIZZAZIONE

Questa parola era sconosciuta fino alla metà del secolo scorso e la sua introduzione nel mondo scientifico è conseguente gli studi pionieristici di almeno quattro scienziati. Ci permettiamo di sintetizzare il loro principale contributo, in un elenco quasi oltraggioso, perché la potenza del loro lavoro può essere compresa solo leggendo estesamente le loro opere:

Belusov 1951: alcuni processi fisico-chimici mostrano comportamenti oscillatori autodeterminati.

Turing 1952: la morfogenesi può essere spiegata con equazioni matematiche.

Lorenz 1972: processi naturali definibili in modo deterministico con equazioni possono mostrare comportamenti caotici (caos deterministico).

Mandelbroth 1979: semplici equazioni matematiche con retroazione possono produrre immagini che spiegano la comparsa di forme complesse nell'universo (frattali).

La complessità biologica è solo parte della complessità che globalmente l'universo conosciuto dimostra. Ovunque si può scorgere un'organizzazione gerarchica della materia che emerge spontaneamente dall'aggregazione e interazione di elementi più semplici, che generano strutture di livello superiore con nuove proprietà emergenti senza la necessità di nessun progetto.

Sbalorditivamente per noi, è solo l'interazione locale, molto locale, a produrre strutture e comportamenti di livello superiore, dalla forma di un fiocco di neve a quella di una foglia, fino al comportamento cosciente di alcuni organismi. Un facile esempio della comparsa di proprietà emergenti delle quali non vi è traccia nei suoi costituenti atomici è nelle qualità dell'acqua: solida a bassa temperatura, liquida e solvente quasi universale alle medie temperature, aeriforme ad alta temperatura.

L'aggregazione di elementi semplici, come ad esempio gruppi di atomi tra qualche centinaio di tipi che conosciamo, per le proprietà combinatorie che è facile intravedere potrebbero generare un numero enorme di tipi di molecole (livello gerarchico superiore), e la combinazione di queste un numero ancora più grande di strutture, che in alcuni casi chiamiamo cellule (livello ancora superiore), e di livello in livello generare un numero astronomico di tessuti, organi, organismi, società, ecc. (Fig. 13).

Fig. 13. Funzioni emergenti. Al progressivo aumento delle funzioni emergenti (curva blu) corrisponde una diminuzione dei gradi di libertà (curva rossa).

Ma l'ambiente, anche per la presenza di strutture che già si sono formate e che continuamente si formano, opera in senso contrario, e tende a limitare i gradi di libertà in ogni livello gerarchico. In questo tiro alla fune contrapposto sono possibili solo le qualità emergenti consentite da quell'ambiente e a quella scala. La liquidità dell'acqua, con le sue peculiari proprietà, esiste solo a livello di aggregazione di molti miliardi di molecole di H2O e per un dato intervallo di temperatura e di pressione. La vita di una cellula emerge e si mantiene solo a livello di strutture plurimolecolari interagenti in determinate condizioni fisico-chimiche ambientali.

A livello biologico tra gli esempi autoorganizzanti più citati vi è quello della colonia di cellule fungine *Dictiostelium Discoideum*, che si disperde nell'ambiente come moltitudine di cellule autonome o si riunisce per formare un organismo compatto, a seconda delle condizioni fisico–chimiche locali, utilizzando segnali chimici tra le singole cellule. Oppure quello del formicaio: in questo caso la struttura funzionale, la ripartizione dei compiti (la raccolta di cibo, l'accudimento delle larve, l'eliminazione dei rifiuti, ecc.) emerge spontaneamente dall'insieme di segnali chimici escreti dalle formiche stesse (ferormoni), operaie e regina. Nessun ordine viene impartito da nessun organismo superiore. La regina

(in realtà più un ovaio che una regina), sempre nascosta nelle profondità del formicaio, non è affatto consapevole di appartenervi, come del resto tutte le altre formiche.

Interi trattati sono stati scritti su questi insetti sociali, e molto è conosciuto, ma continuamente vengono scoperti comportamenti strabilianti. Tra le ultime acquisizioni si è scoperto che il formicaio ha una vita correlata alla vita e alle secrezioni della regina, che, sola tra le altre formiche, vive più di 15 anni, ed il formicaio segue un processo di giovinezza, maturità e senescenza come quello di altri animali multicellulari, caratterizzato da progressive modificazioni comportamentali. Per menzionarne una: un formicaio giovane è molto più aggressivo di un formicaio vecchio, nonostante le formiche che lo formano vivano singolarmente non più di un anno. Il paragone con la senescenza di animali di grandi dimensioni e l'avvicendamento di alcune cellule del loro corpo è inevitabile.

Insomma il piano esplicito di un formicaio, come quello di un mammifero, non è collocato interamente nel codice genetico, ma è la continua interazione tra i costituenti l'individuo (DNA, cellule, organismi simbionti, parassiti, organismi sociali, ecc.) che progressivamente si formano, e l'ambiente nel quale sono immessi, che retroattivamente costruisce l'organismo stesso, formicaio o uomo. La ricetta è: genoma e retroazione locale e ambientale (epigenetica), non solo genoma. Esperimenti sui vegetali hanno mostrato che in condizioni di microgravità (voli spaziali) il loro sviluppo embrionale è deformato. Come dire che una pianta di fagioli è tale se c'è un DNA, una gravità, una radiazione elettromagnetica, e un clima che costituisce l'ambiente terrestre nel quale si è evoluta.

Il Caenorhabditis Elegans è un verme nematode, lungo circa 1 mm, il cui sistema nervoso è ampiamente studiato ed è costituito da 302 neuroni (sì, sempre esattamente 302, connessi da circa 5000 sinapsi). Il suo DNA è costituito da 19000 geni, di cui circa la metà (9000) è dedicata alla sua piccola struttura neuronale (Fig. 14).

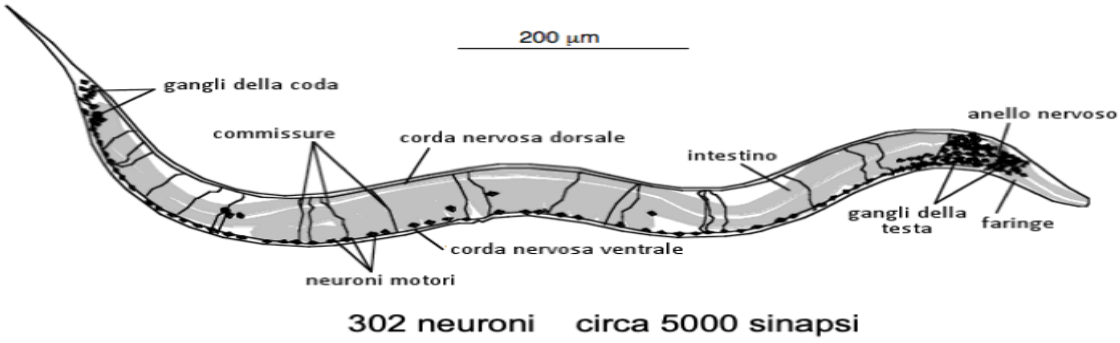


Fig. 14. Caenorhabditis Elegans.

Dei soli 23000 geni del DNA dell'uomo (appena 4000 in più di quelli del vermiciattolo di cui sopra) 16000 dovrebbero definire la raffinata e complessa struttura di più di 100 miliardi di neuroni e della vertiginosa quantità di sinapsi tra loro che costituisce il cervello umano? Non è certamente possibile. È necessario quindi accettare che il DNA fornisca indicazioni generali sul fenotipo che costruirà, ma che i dettagli come il numero di neuroni che costituiranno quel dato nucleo, o la forma e dimensione di quelle specifiche aree della corteccia, dipendano da informazioni che emergono localmente e retroattivamente a ciò che progressivamente si viene a costituire. Questa proprietà può essere considerata parte dell'epigenetica, che collega la costruzione del fenotipo all'interazione con l'ambiente (anche microambiente) nel quale si sviluppa e che fa di ogni individuo di una specie un individuo unico nella sua intima costituzione. Un paragone banale: le case costruite in schiera sulla base di un unico progetto avranno la stessa forma, ma il numero e la posizione dei mattoni potrà variare molto dall'una all'altra, perché nel progetto non sono definiti il numero e la posizione dei mattoni, ma solo la dimensione e collocazione dei muri.

Bisogna quindi supporre che l'evoluzione abbia modellato quel dato DNA dalla "constatazione" (scusate la terminologia umana) che le informazioni dettagliate emergeranno in corso d'opera dall'interazione fra le componenti in sviluppo e fra esse e l'ambiente. È veramente difficile accettarlo, ma è sicuramente vero, e dimostrabile con modelli evolutivi informatici (automi cellulari e reti neurali artificiali). Per il mondo biologico basti pensare che in un embrione all'inizio del suo sviluppo la differenziazione fra parte ventrale e dorsale, essenziale a tutte le successive fasi di sviluppo, sembra utilizzare la unica e affidabile presenza del vettore gravità, come evidenziato da esperimenti in microgravità su satelliti orbitanti, prima descritti, che scombinano fortemente lo sviluppo fenotipico.

Più aumentano le conoscenze sui dettagli di funzionamento delle strutture che costituiscono l'individuo, i singoli organi, le singole cellule cooperanti, le loro microstrutture, e la biologia molecolare che ne regola i metabolismi, più ci si accorge che nessun *progetto intelligente* potrebbe prevedere lo sviluppo del singolo organismo partendo da un piano, per quanto dettagliato, che includa anche l'assemblaggio di tutti i più minuti costituenti, poiché solo le interazioni tra questi e le caratteristiche fisico-chimiche del micro e macroambiente circostante, con le retroazioni intrecciate che ne conseguono, consentono lo sviluppo di una tale complessità. Di nuovo epigenetica in funzione.

Potremmo ampliare questo concetto e affermare che tutte le strutture dell'universo, per quanto complesse, sono costruite solo da regole locali, molto locali, e per di più emergenti esse stesse. Un campo elettrico o gravitazionale esiste se c'è una carica elettrica o una massa; le *leggi fisiche* sono anch'esse emergenti, non sono preesistenti.

Prigogine, alcuni anni fa, ha coniato il termine *strutture dissipative* per indicare alcuni particolari fenomeni fisico-chimici che mostrano un'organizzazione strutturale, una forma dinamica, grazie ad interazioni materiali locali consentite dalla utilizzazione di energia proveniente dall'esterno del fenomeno; ad esempio la formazione di celle di convezione termica in un liquido riscaldato uniformemente, o i vortici d'acqua od aria che si manifestano e si mantengono per lunghi periodi grazie al continuo apporto di materia ed energia. Di fatto queste strutture, dissipando energia, producono un incremento di ordine locale, una diminuzione di entropia locale a scapito di un aumento altrove.

Può apparire strano, ma la comparsa di qualità emergenti comporta una diminuzione delle possibilità di combinazione dell'aggregazione della materia, perché esse indicano che è stato selezionato uno, o solo alcuni, dei numerosissimi possibili modi d'interagire delle componenti del sistema.

Quando idrogeno e ossigeno si uniscono per formare una molecola di acqua, di fatto vengono inibite molte delle proprietà potenziali che i due atomi avevano quando non erano congiunti. Sinteticamente si può affermare che i gradi di libertà del sistema vengono ridotti dall'interazione emergente tra i vari componenti in un dato ambiente: la complessità aumenta, l'entropia localmente diminuisce, perché parte dell'energia si trasforma in strutture, e ciò può essere considerato un aspetto della selezione naturale.

Come si è accennato, questo processo auto-organizzante è attivo a tutti i livelli: a livello della materia inorganica (atomi, molecole, cristalli, ecc.); a livello di strutture e organismi biologici; ma anche a livello di prodotti culturali come ad esempio le città (o pensate davvero che lo sviluppo di megalopoli di vari milioni di abitanti sia sotto il controllo di un sindaco e della sua giunta?). E che dire di Internet? La Rete è nata come un poderoso archivio globale, e tale può essere ancora considerata; quello le che le manca per essere un organismo auto-organizzato è una massiccia retroazione locale (in questo caso *locale* non in senso spaziale, ma di correlazione funzionale), ma questo accadrà presto, anzi sta già accadendo. Gran parte dei siti che esploriamo, in modo esplicito o implicito, riesce ad ottenere informazioni sul gradimento delle proprie offerte e su alcune caratteristiche dell'utente (oggi si chiama profilazione). Inoltre quando l'Internet degli Oggetti (IoT, Internet of Things) sarà diffuso, e tutte le automobili, gli elettrodomestici e quant'altro saranno connessi, **la Rete** disporrà di una quantità d'informazioni in tempo reale che **le** consentirà rapide reazioni davvero interessanti e per ora non immaginabili. Stiamo tranquillamente vendendo l'anima al diavolo senza accorgercene, in cambio d'informazioni, di belle immagini e altro, *apparentemente* gratis. Permettiamo che la Rete sia informatissima della nostra vita, attraverso le comunicazioni che la maggior parte delle persone fa attraverso i siti Social. Google, ad esempio, già effettua una valutazione statistica dello stato emotivo istante per istante di tutti coloro che ad esempio scrivono la frase "sono felice" o "sono triste" o quant'altro, in tutte le lingue, ed in correlazione con altri dati dei singoli utenti. Capite bene che in questo modo potrà controllare e dirigere sempre più il nostro comportamento; proprio un *Grande Fratello* come George Orwell aveva previsto.

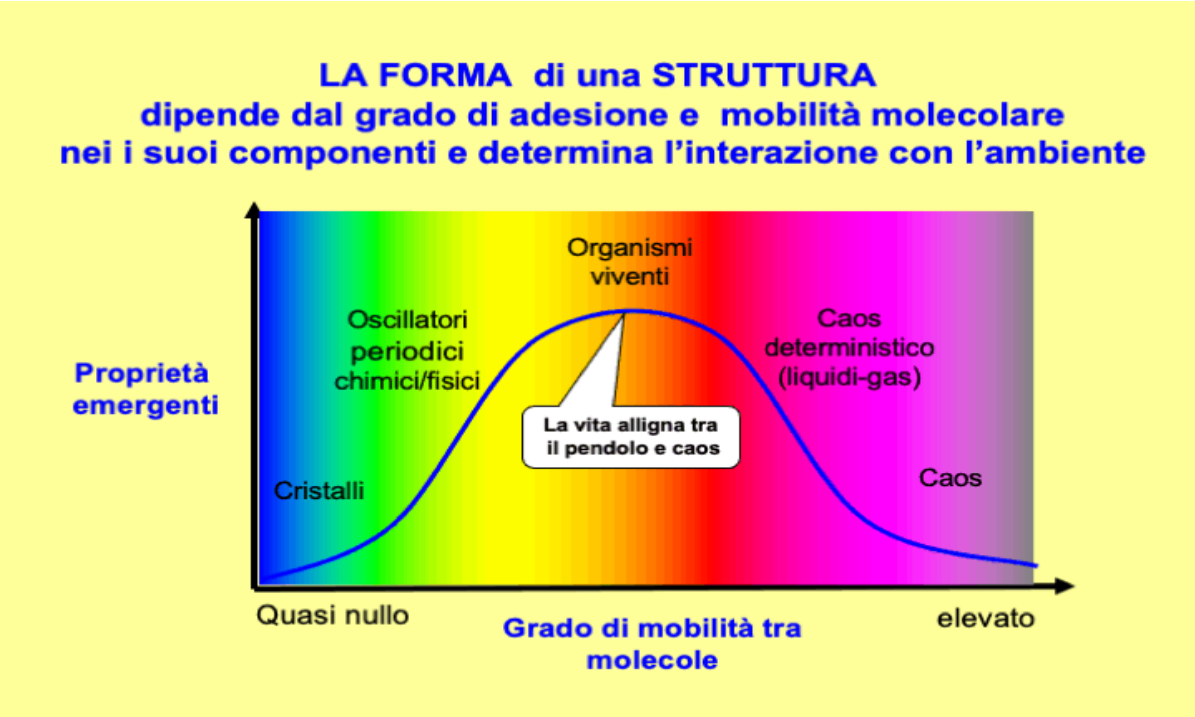
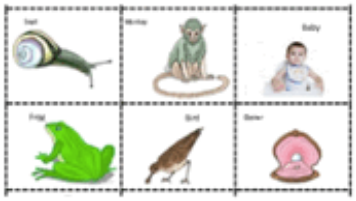


Fig. 15. Aggregazione della materia. La curva a campana illustra la relazione tra il grado di mobilità molecolare e la probabilità di comparsa di funzioni emergenti.

La fine del Personal Computer? Tutto si sta spostando sul *Cloud*, riversiamo nelle *nuvole* una crescente quantità d'informazioni personali in cambio di un'accessibilità a questi dati da qualunque dispositivo collegato in rete in qualunque parte del mondo, e ormai gran parte delle elaborazioni viene effettuata al di fuori del nostro PC: basti pensare ai traduttori online, ai navigatori stradali, ai giochi elettronici condivisi, ai flussi finanziari ed energetici. La banda web aumenta di velocità ogni anno (non pensate all'Italia ora), il PC o lo smartphone stanno diventando ormai solo velocissimi comunicatori con la rete, relativamente poche operazioni vengono effettuate a bordo, uno smartphone non connesso serve ormai veramente a poco, e per molti umani già ora per vivere è necessario essere connessi. Il Grande Fratello controllerà tutto nelle nostre vite; e allora perché usare ancora pensiero, memoria, ragionamento? Ripetiamo, quello che non serve e costa viene eliminato, evoluzione docet.

Le condizioni che appaiono necessarie perché possano comparire qualità emergenti sufficientemente stabili e quindi funzionalmente operative in un sistema fisico come internet sembrano essere principalmente tre: la quantità degli elementi interagenti, la quantità d'informazione scambiata tra loro e la retroazione degli effetti nella rete stessa, e tutte devono essere elevate, ma non troppo, altrimenti la stabilità del sistema è compromessa e si scivola nel comportamento caotico. Si potrebbe supporre che le qualità emergenti che producono strutture complesse o viventi sono quelle che si collocano a metà strada tra sistemi che oscillano periodicamente e sistemi del tutto caotici. La vita alligna tra il pendolo e il caos! (Fig. 15).

12. FORMA CORPOREA



Quanto segue è una sintetica ipotesi sulle maggiori pressioni evolutive ambientali che possono indirizzare la forma, e quindi il funzionamento, degli organismi viventi su questo pianeta, costruita su osservazioni e dati tratti da innumerevoli articoli scientifici di biologia, di anatomia comparata e di evoluzionismo accumulati nel corso degli ultimi due secoli. È un'ipotesi che proponiamo: non abbiamo quindi la pretesa che sia compiutamente vera, ma ci appare probabile.

Fig.16. Dipendenza della forma del corpo dall'ambiente.

Su questo pianeta, e probabilmente su molti altri, esistono energie e forze perpendicolari alla superficie, che hanno un valore quasi costante, come la gravità con il conseguente gradiente di pressione atmosferica e marina, oppure una direzione e un'intensità ciclicamente variabili, come l'irraggiamento

elettromagnetico solare circadiano e circa-annuale. Esistono anche forze o energie che agiscono invece con componente prevalentemente orizzontale, e queste sono ampiamente variabili da punto a punto del pianeta e da momento a momento (irraggiamento riflesso, correnti d'aria e d'acqua, reazioni vincolari del terreno, ecc.). In conseguenza di queste forze organismi non mobili (piante od animali sessili come alcuni celenterati marini) sviluppano geneticamente un'asimmetria verticale: fogliame e radici, piede di aderenza e stoma, mentre la forma delle sezioni orizzontali (rami) è variabile da individuo ad individuo e dipende appunto dalla particolare configurazione delle pressioni orizzontali locali (luci, ombre, temperature, correnti) o semplicemente dal caso. Inoltre più le specie sono complesse e reattive più la loro forma dipende dall'interazione con l'ambiente e con tutte le altre specie presenti (Fig. 16).

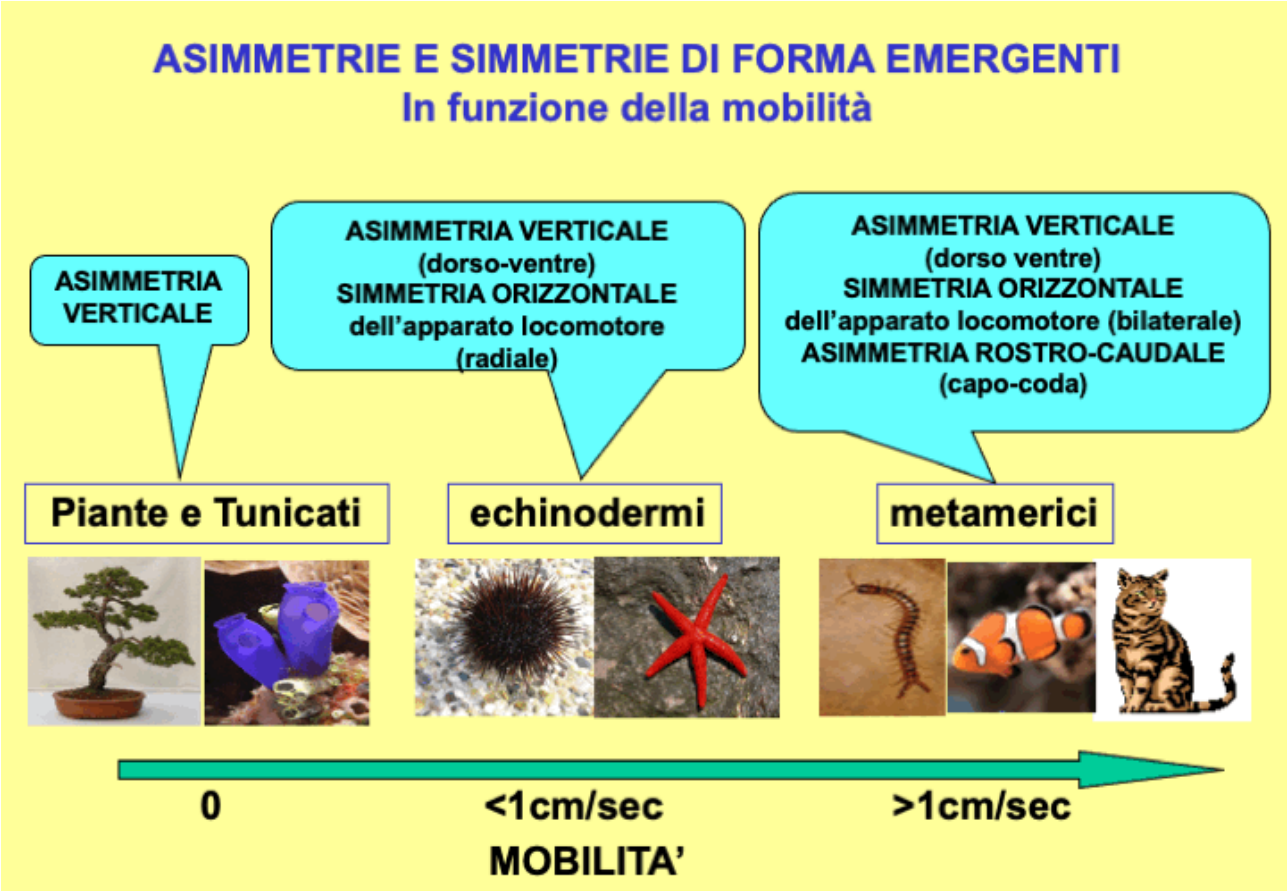


Fig. 17. Simmetria corporea e mobilità.

Organismi che iniziano a muoversi nell'ambiente sviluppano geneticamente anche una simmetria orizzontale. Nell'ambiente liquido, se è consentita la libera deriva (meduse) o è privilegiata l'aderenza al fondo rispetto alla velocità del movimento (ricci e stelle marine), compare una simmetria radiale. In organismi nei quali prevale la mobilità rispetto all'aderenza al fondo (pesci ecc.) compare una simmetria bilaterale e, collegata con essa, necessariamente un'asimmetria rostro-caudale (una testa e una coda per dare un verso al movimento). Non a caso organismi poco mobili con simmetria radiale sono presenti

solo in ambiente liquido, dove i nutrienti vengono facilmente trasportati dalle correnti e queste possono essere abbastanza intense da richiedere efficaci meccanismi di aderenza al fondo (Fig. 17).

Il processo evolutivo si manifesta con lo sviluppo progressivo di meccanismi motori che tendono a migliorare le capacità d'esplorazione dell'ambiente per la ricerca di nutrienti e per l'evitamento di pericoli (caccia e fuga), e successivamente per la modificazione dell'ambiente circostante a proprio vantaggio (tane, nidi, coltivazioni, strade ecc.). Capacità motorie sempre più articolate necessitano di un sistema di comunicazione interna tra sensori ed effettori sempre più sofisticato e rapido come un sistema nervoso.

La simmetria bilaterale che si osserva nella maggior parte degli animali più evoluti è tale solo a livello somatico esterno, in particolare per quanto riguarda gli organi di locomozione e di sensorialità, tranne qualche eccezione come nei *granchi chela grande* o nelle *sogliole*, ove comunque l'asimmetria somatica esterna bilaterale ha una ben precisa ragion d'essere per il comportamento dell'animale, e appare essere una modifica di una precedente genetica simmetria. Già negli insetti, ma ancor più nei mammiferi, per rimanere nell'ambito di animali più prossimi a noi, a livello di organi interni toraco-addominali si nota una forte asimmetria di posizione (cuore, stomaco, fegato, milza), e anche in organi pari come i polmoni e i reni si apprezzano notevoli differenze morfologiche tra i due lati. Tale asimmetria è presente anche nel sistema nervoso centrale. Le strutture paleo encefaliche (talamo, amigdala, nuclei basali e cervelletto) mostrano un certo grado di asimmetria, più funzionale che morfologica, almeno nei primati e uomo, per non parlare delle marcate asimmetrie funzionali (e in parte anatomiche) della corteccia cerebrale.

Sembra dunque di poter supporre che la simmetria bilaterale sia necessaria solo per quanto riguarda i sensori e gli effettori che interagiscono con l'ambiente, e ovviamente la loro innervazione periferica. Invece a livello del sistema nervoso centrale più aumenta la complessità delle strutture encefaliche, e più funzionalmente distanti dalle strutture sensori-motorie periferiche esse sono, più si osserva una distribuzione funzionale asimmetrica. D'altronde anche in molte macchine costruite dall'uomo la simmetria strutturale riguarda appunto solo le parti in contatto con l'ambiente (ruote, ali, ecc.) e non gli organi di controllo (lateralizzazione del posto di guida negli autoveicoli).

Storicamente la prima asimmetria funzionale corticale individuata è rappresentata dalla prevalente localizzazione a sinistra delle aree del linguaggio espresso e percepito (aree di Broca e Wernicke); ma successivamente moltissime altre asimmetrie funzionali, talvolta accompagnate da minime asimmetrie morfologiche, istologiche e biochimiche, sono state osservate.

Molti studi con neuro immagini funzionali hanno accertato che tali differenze sono anche temporalmente distribuite. Di fronte ad un compito nuovo l'attivazione corticale prevalente appare essere, nel soggetto normale, l'area prefrontale destra (novità). Dopo un congruo periodo di addestramento, di fronte ad un compito simile, l'area più attiva sembra essere parte della corteccia prefrontale sinistra (esperienza). Successivamente di fronte a compiti ripetitivi conosciuti ed in parte automatizzati si attivano prevalentemente solo le aree associative posteriori (routine) (Fig. 18).

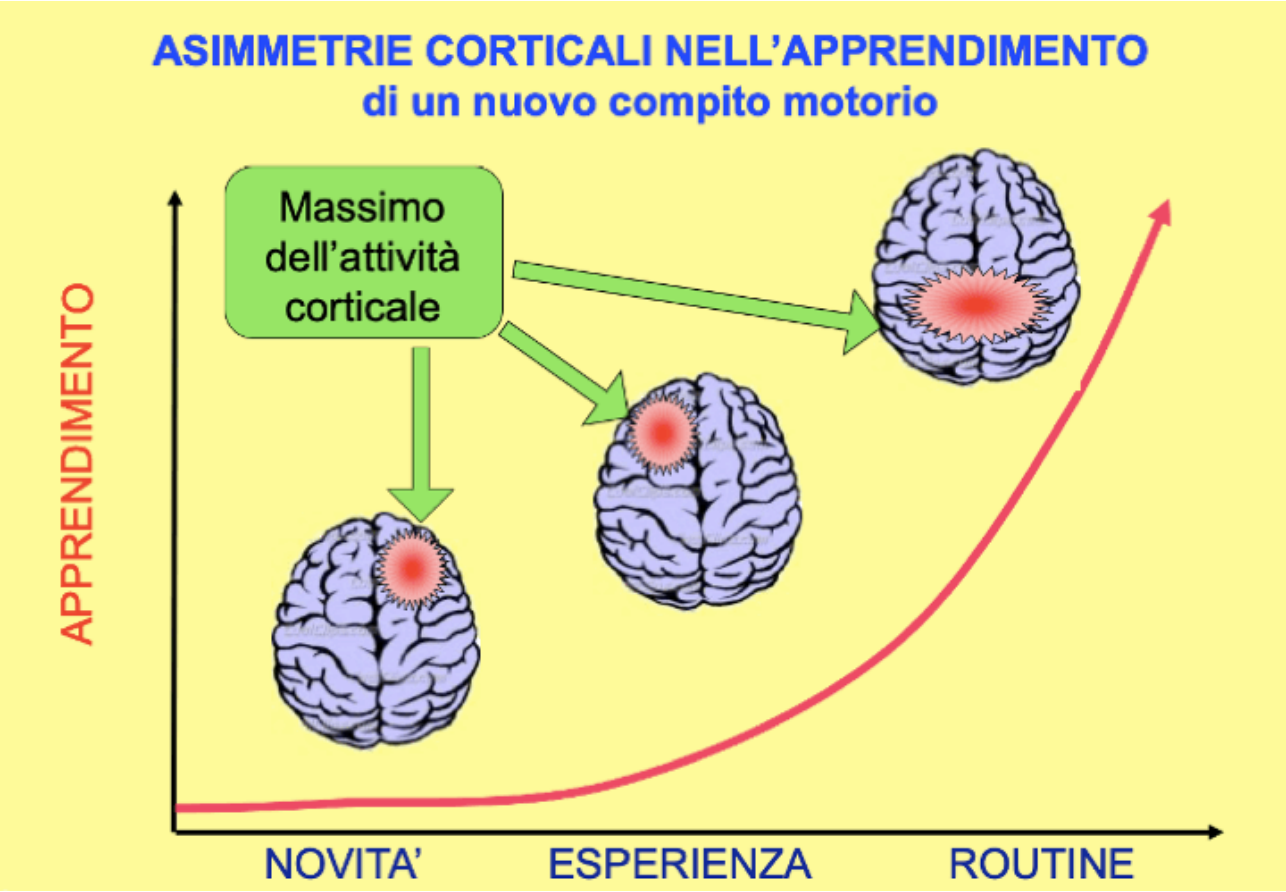


Fig. 18. Asimmetrie funzionali corticali encefaliche. Nel corso dell'apprendimento di un comportamento ripetitivo il massimo dell'attività neuronale si sposta dalle aree prefrontali destre a quelle sinistre, e poi alle aree associative posteriori.

13. INTERAZIONE AMBIENTALE

L'essenza dell'evoluzione biologica, come si è detto, è costituita da un incessante automatico processo di adattamento delle specie all'ambiente mutevole. Le modalità di adattamento sono funzione della complessità della specie. Organismi semplici (batteri) si adattano velocemente, non singolarmente ma nella specie, per mutazione genetica e selezione naturale. Organismi più complessi si adattano individualmente alle variazioni ambientali tramite strategie automatiche innate di compenso (omeotermia, migrazioni). Animali ancora più complessi cercano di adattare l'ambiente a sé stessi con comportamenti geneticamente determinati (es. costruzione di nidi e tane o trappole) o fenotipicamente appresi (cultura) (Fig. 19).

Fig. 19. Aumento di complessità degli organismi e ricorsività ambientale.

Tutte le definizioni sono opinabili, e quindi anche i confini tra genotipo e fenotipo non sono così netti come si vorrebbe. Continueremo comunque a definire genetico quanto trasmesso da una generazione all'altra attraverso il codice genetico molecolare del DNA, e fenotipico l'aspetto fisico e comportamentale, individuale e mutevole nel corso della vita in risposta alle interazioni con l'ambiente, che però non modifica (almeno direttamente) il patrimonio genetico delle cellule germinali. In particolare, per il comportamento parleremo di comportamento prevalentemente genetico (o genotipicamente appreso) quando l'addestramento individuale non è quasi necessario, e prevalentemente fenotipico (o fenotipicamente appreso) quando l'addestramento individuale è preponderante (esempi nell'uomo: respiro: genetico; mimica: genotipico-fenotipico; scrittura: fenotipico).

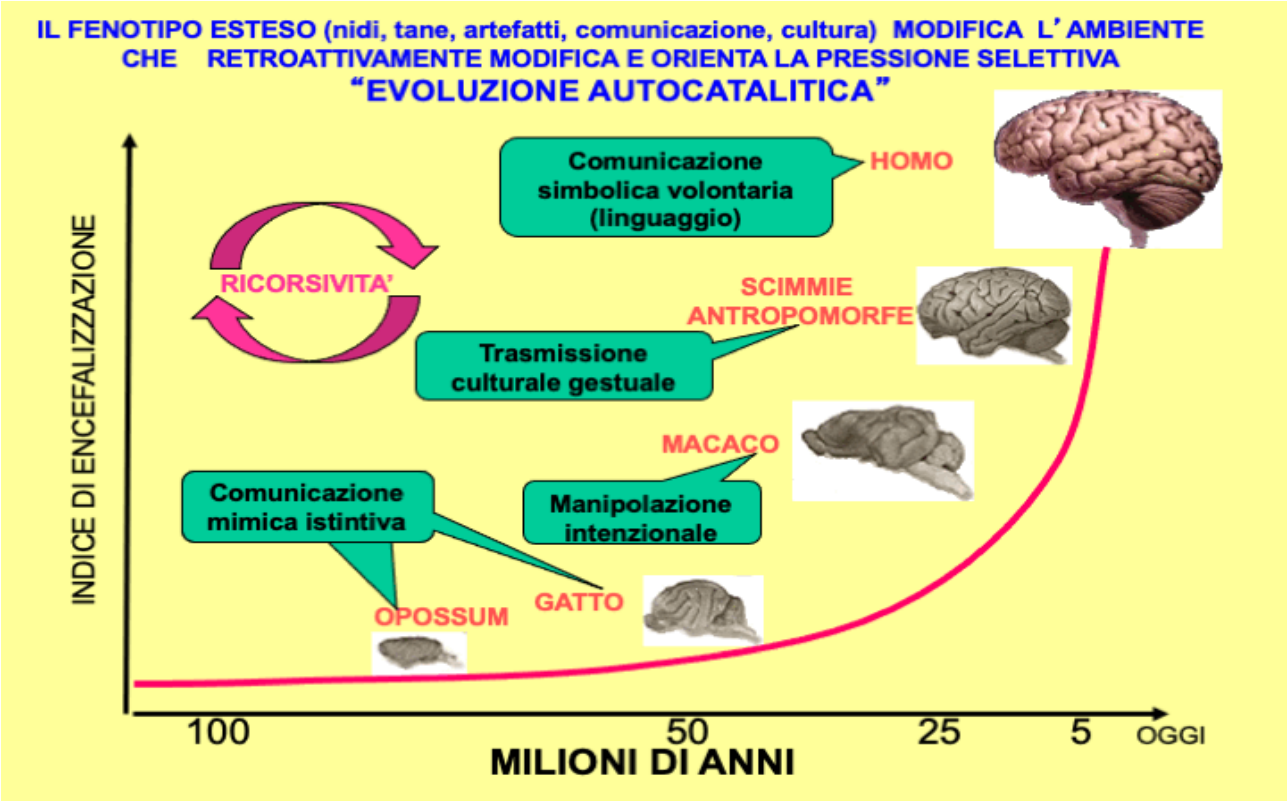


Fig. 20. Evoluzione dell'encefalo.

Quanto poi alle considerazioni che le variazioni fenotipiche del singolo individuo non modificano il patrimonio genetico (ad es. lo sviluppo muscolare a seguito di un particolare addestramento non è trasmesso alla prole) si può sollevare qualche obiezione. Non che Lamarck avesse ragione, ma esiste il cosiddetto effetto Baldwin (selezione organica, ortoplasia), per cui il comportamento fenotipicamente appreso modifica le probabilità di sopravvivenza e di riproduzione, e di conseguenza *indirizza* la selezione verso individui che mostrano sempre più consistentemente la capacità di apprendere (retroazione positiva). Specie dotate di una iniziale plasticità sinaptica (possibilità di modificare le connessioni tra neuroni, e quindi di apprendere nuovi comportamenti) retroattivamente tendono a sviluppare sempre più velocemente e consistentemente questa qualità. Per milioni di anni sono

sopravvissuti solo i più adatti, e tra questi i più intelligenti (individui in grado di orientare meglio i propri comportamenti innovativi) hanno avuto prole più abbondante, anche se da un po' di tempo le cose tra gli umani non sembrano più andare esattamente così.

Ma inoltre, come abbiamo già detto, l'epigenetica può costituire *una memoria a breve termine* (qualche generazione) di particolari critiche situazioni ambientali che modificano in queste generazioni il comportamento senza modificare il DNA in modo da facilitarne la sopravvivenza se le suddette situazioni ambientali dovessero permanere (es. carestie).

Bisogna infine considerare che, come il comportamento geneticamente determinato, così anche il comportamento fenotipicamente acquisito può modificare l'ambiente fino a cambiarne la pressione ambientale selettiva sugli individui che lo occupano (si pensi alla pressione esercitata dal linguaggio una volta introdotto nell'ambiente) o fino ad esporre le cellule germinali degli individui a nuove situazioni capaci di mutarne direttamente e singolarmente il patrimonio genetico trasmissibile (cambiamenti termici, cambiamenti alimentari, esposizione a inquinanti, a radiazioni ecc.) (Fig. 20).

Dawkins parla anche di *fenotipo esteso* per includere nel fenotipo anche i prodotti di comportamenti innati, come la costruzione di un nido, la tela del ragno, o la diga dei castori, e a questo punto dovremmo includere anche i prodotti culturali come fenotipo esteso dell'uomo (Fig. 21).

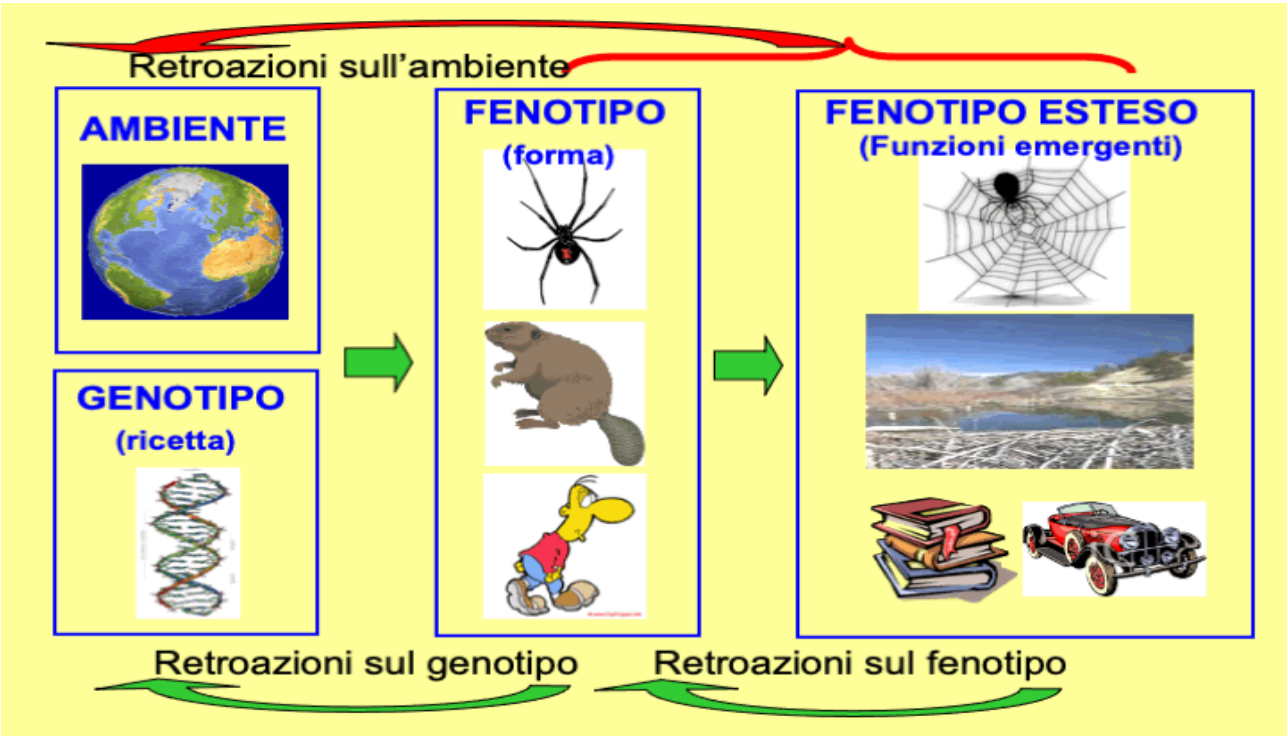


Fig. 21. Retroazioni tra genotipo, fenotipo, fenotipo esteso e ambiente.

Le modalità d'interazione con l'ambiente sono frutto di una commistione di sequenze sensori motorie, in parte istintive (geneticamente ereditate), in parte apprese. In realtà più che una commistione è forse

una stratificazione gerarchica, nel senso che il comportamento istintivo è predominante di fronte a situazioni di emergenza o fondamentali (difesa, aggressione, fame, sete, accoppiamento), perché garantisce la rapidità ed efficienza necessarie al momento, qualità affinate evolutivamente in milioni di anni. Invece in situazioni meno pericolose o meno urgenti subentrano progressivamente prima comportamenti personalmente appresi, poi culturalmente condivisi o progettati innovativamente. Questa stratificazione è evidente in tutti i primati, Sapiens incluso.

A dirla brutalmente: per dimostrarsi colto e gentile l'Uomo deve avere lo stomaco pieno, l'intestino e la vescica vuoti, essere sessualmente soddisfatto, e non essere in pericolo; e scusate se è poco. Da ultimo, poi, l'attuale capacità di modificare intenzionalmente in nostro patrimonio genetico con tecniche d'ingegneria molecolare costituisce la prova definitiva che il fenotipo, con le sue estensioni culturali, può modificare consistentemente il genotipo indirizzando pesantemente l'evoluzione (chissà dove). Di fatto questo già da qualche tempo avviene sia a livello vegetale che animale con gli organismi geneticamente modificati. Ultimo arrivato il metodo CRISPR, il cui kit si vende in rete a pochi dollari, che permette il *fai da te* delle modificazioni genetiche (Fig. 22). Un rischio altissimo, ci sembra.

Fig. 22. pubblicità CRISPR su internet.

Bisognerebbe valutare attentamente la questione della modifica intenzionale del genotipo. È vero che il fenotipo può, come si è detto, influenzare l'evoluzione attraverso le modificazioni ambientali che produce; ma, se l'evoluzione ha separato e protetto il genoma germinale da quello somatico relegandolo in poche cellule rinchiuse negli organi genitali, potrebbe non essere una buona idea ribaltare la situazione e permettere al fenotipo di modificare, con i suoi effimeri prodotti culturali, direttamente il genotipo germinale.

Negli ultimi cento anni sono sorti vari modelli che tentano di precisare le leggi che regolano l'evoluzione biologica, modelli che non sono affatto sovrapponibili. Alcuni tendono a privilegiare la selezione ambientale, altri i meccanismi interni al genoma; ma a noi sembra, come abbiamo già detto, che l'elemento più importante sia l'interazione e retroazione degli effetti, e che sia largamente sottovalutato. L'efficacia dei meccanismi retroattivi e interattivi può spiegare l'andamento esponenziale dei processi evolutivi su questo pianeta che possiamo qui riassumere:

- 3,7 miliardi di anni fa circa comparsa della vita: strutture microbiche procariote senza nucleo.
- 1 miliardo di anni fa: cellule eucariote con nucleo.
- 500 milioni di anni fa: animali pluricellulari.
- 50 milioni di anni fa: proscimmie.
- 5 milioni di anni fa: ominidi.
- 0,05 milioni di anni fa: Homo Sapiens.

L'esplosione di biodiversità del cambriano 540 milioni di anni fa sembra che abbia generato i precursori di tutte le specie viventi attuali e di molte ormai estinte. Forse questa esplosione è stata prodotta da una situazione retroattiva critica che potrebbe essere stata la comparsa di organismi pluricellulari. Finché l'evoluzione non ha scovato meccanismi che consentissero la cooperazione di cellule eucariote stabilmente contigue per formare strutture, la possibilità che comparissero organismi pluricellulari era impedita. Quando questa possibilità è comparsa, la presenza di organismi sempre più grandi e complessi ha prodotto retroattivamente mutamenti ambientali tali da facilitare una speciazione esplosiva.

Ovviamente la contiguità cellulare stabile non dev'essere stata l'unica condizione mancante che ha prodotto una stasi evolutiva di più di un miliardo di anni. Evidentemente sono dovuti comparire anche i meccanismi di comunicazione intercellulare, di riproduzione, e chissà cos'altro. Ma di fatto è stata la comparsa di organismi pluricellulari reattivi all'ambiente che ha aperto la strada alla enorme biodiversità del periodo cambriano, che perdura tuttora nonostante ricorrenti episodi catastrofici planetari di estinzione di massa (Permiano, Giurassico e altri), che per altro hanno inciso prevalentemente sugli organismi più grandi e specializzati, non sui batteri.

Dobbiamo sempre tenere presente che le nuove generazioni nascono da genitori adatti all'ambiente in cui hanno vissuto, e non è detto che tale ambiente sia stabile e uguale anche per i figli: di qui l'utilità di una progenie casualmente diversificata che verrà selezionata dalle nuove condizioni ambientali. Insomma, come si è detto, l'evoluzione è cieca sul futuro, ma la variabilità delle mutazioni genetiche è un ottimo meccanismo di adattabilità della specie al futuro ignoto.

L'accelerazione evolutiva che ha prodotto le specie Homo sembra in qualche modo dovuta a radicali cambiamenti climatici nell'Africa di 400.000 anni fa, dove esse sono comparse. La riduzione dell'umidità

ha ridotto le foreste a vantaggio delle savane, e questa modificazione ambientale ha prodotto una catena di eventi interconnessi che riduttivamente possiamo cosi elencare: diminuzione della fauna e flora edibile, con vantaggio dell'alimentazione onnivora; vantaggio della posizione eretta, che in questo nuovo ambiente amplia il campo visivo; conseguente irrobustimento del bacino e dei glutei, con miglioramento anche della corsa; comparsa di ghiandole sudoripare distribuite in tutto il corpo e scomparsa dei peli, con miglior raffreddamento nella corsa prolungata (caccia / fuga); liberazione degli arti anteriori (ora superiori) da compiti deambulatori e loro utilizzo per manipolazione e lancio di oggetti (pietre, lance, lame, raschietti); comparsa di vocalizzazioni per la cooperazione nella caccia; cottura degli alimenti che ne ha migliorato notevolmente la digestione e il nutrimento; e chissà cos'altro.

Abbiamo già detto che la diatriba tra processi evolutivi graduali continui e processi a salti punteggiati è priva di senso, dato che l'evoluzione è un processo caotico deterministico e quindi soggetto a cambiamenti improvvisi, periodi di stasi e rimaneggiamenti catastrofici. Ma, anche se il processo dei cambiamenti evolutivi del DNA fosse graduale e continuo, i suoi effetti sul fenotipo potrebbero manifestarsi a balzi con un meccanismo analogo alla *auto-organizzazione per punti critici*. Se un rivolo di sabbia cade con regolarità di flusso sempre nello stesso punto, come la sabbia in una clessidra, la collinetta sottostante cresce a balzi, non in modo continuo come invece il fluire dei granelli. Alcuni granelli cadono e si accatastano formando un piccolo cono; quando questo raggiunge dimensioni critiche in relazione alla dimensione dei granelli può comparire una piccola frana, che riduce l'altezza del cono ma ne allarga la base, e ora un altro piccolo cono comincia a crescere fino a collassare, e il ciclo riprende con intervalli randomici. Un fenomeno continuo e *regolare* come il fluire della sabbia nel collo della clessidra, a causa di fattori locali ampiamente stocastici, diventa così un fenomeno a *gradini irregolari*, e gli esempi di questo tipo sono molteplici (magnetizzazione a salti di Barkhausen).

L'influenza retroattiva dell'ambiente dunque è fortemente presente nello sviluppo di ogni fenomeno fisico, chimico o biologico. In quest'ultimo caso non agisce solo, come tradizionalmente si pensa, sul fenotipo nato, ma anche sull'embrione, sulla sua espressione genica (epigenetica, geni promotori) ed anche sulla sequenza genomica (DNA).

14. COMUNICAZIONE

Una tappa fondamentale nel processo evolutivo è stata, come si è detto, la comparsa di organismi multicellulari; aggregati di singole unità elementari già autosufficienti che, per il fatto di essere in stretto contatto tra di loro, manifestano comportamenti ben superiori alla somma dei comportamenti delle singole unità. Queste caratteristiche, già definite emergenti, lasciano spesso perplessi quanti vogliono a tutti i costi cercare un progetto costruttivo preesistente ad ogni specie vivente, ma l'evidenza della loro esistenza è onnipresente in natura. Abbiamo già ricordato l'esempio delle proprietà dell'acqua. E si pensi alle proprietà biologiche di una proteina, la cui sequenza amminoacidica è assemblata all'interno della cellula dai ribosomi su traduzione del codice genetico, ma la cui forma (il ripiegamento), che ne determina la funzione, è causata dalla specifica sequenza molecolare di quella proteina e dalle caratteristiche dell'ambiente nel quale è immessa; forma che viene espressa (emerge) solo dopo che la proteina è completamente assemblata (Fig. 23).

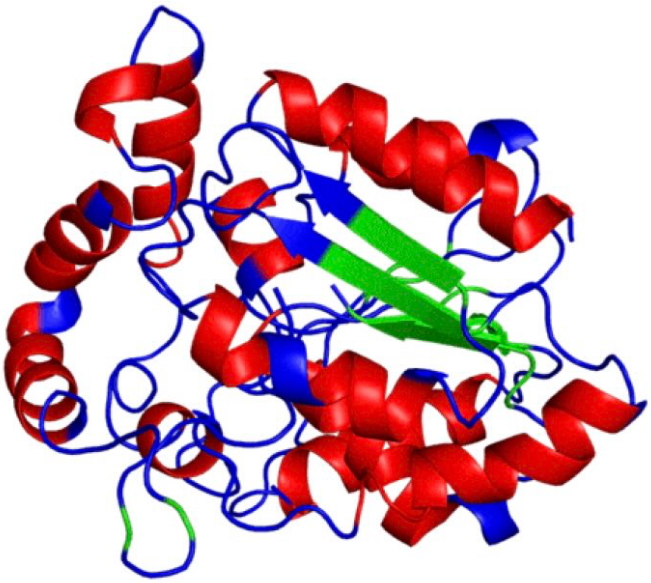


Fig. 23 (animata). Struttura 3D di una proteina.

Cosa promuove la comparsa di proprietà emergenti? Come si è già detto, l'interazione tra i componenti: a livello molecolare, come nell'esempio della proteina, la configurazione sterica (la sua forma

tridimensionale) e la disponibilità di legami chimici modificabili; a livello biologico multicellulare, quindi ad una scala superiore, la *comunicazione* che si stabilisce tra le singole cellule dell'organismo. A questa scala la comunicazione è di tipo molecolare o ionico: molecole che assicurano il contatto o la repulsione tra membrane contigue, e molecole o ioni che passano attraverso le membrane. In qualunque caso, la comunicazione è sempre necessariamente una codifica: che sia un segnale chimico-fisico o un linguaggio evoluto, essa è sempre necessariamente riduttiva rispetto al fatto o fenomeno da comunicare.

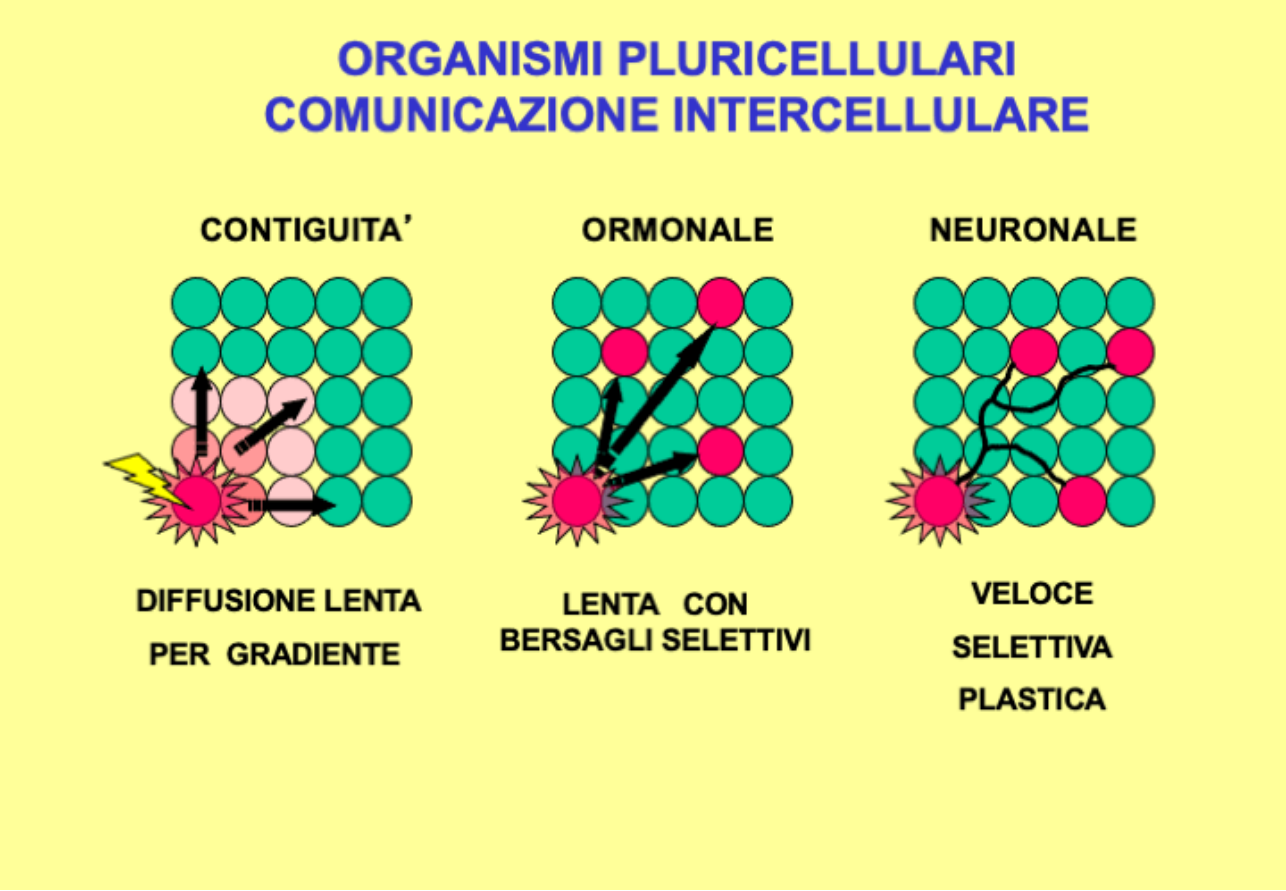


Fig. 24. Modalità di comunicazione intercellulare.

In modo molto schematico possiamo individuare almeno tre modalità di comunicazione cellulare nell'ambito di un singolo organismo pluricellulare (Fig. 24):

- Comunicazione per contiguità: prodotta da modificazioni di natura chimica o fisica nelle cellule, conseguenti a eventi esterni temporanei (contatto, prossimità). Una o più cellule sintetizzano ed espellono alcune sostanze in seguito allo stimolo locale, e si viene a costituire un gradiente di concentrazione locale che può favorire la diffusione della sostanza in questione tra le cellule più prossime della struttura. Questa modalità è lenta, aspecifica e transitoria.

- Comunicazione ormonale: un meccanismo più complesso del precedente è quello che avviene tramite la produzione di particolari molecole e loro diffusione nel liquido intercellulare o nel torrente circolatorio, e la presenza di molecole chimicamente affini (che funzionano da *recettori*) in altre cellule anche molto distanti. La fusione tra questi due tipi di molecole catalizza altri processi biochimici. Questa comunicazione è selettiva e particolarmente efficace nella modulazione delle risposte comportamentali, ma ancora necessariamente lenta.

- Comunicazione neuronale: è una combinazione delle due precedenti, con in più una modificazione di forma di alcune cellule che costruiscono ponti citoplasmatici di contatto con cellule lontane (precursori degli assoni delle cellule nervose). In questo modo la comunicazione è selettiva, rapida ed economica.

Vedremo più avanti che questo processo evolutivo di affinamento delle modalità di comunicazione avviene anche nell'ambito dello stesso sistema nervoso, dove le strutture più primitive utilizzano meccanismi di contiguità, quelle intermedie di tipo ormonale, e quelle più recenti di tipo connessionista neuronale.

Già a livello cellulare la comunicazione rappresenta una compressione dell'informazione. In termini informatici è una codifica riduttiva di un evento, dove riduttiva significa che una parte dell'informazione (evidentemente non indispensabile) viene persa. Ad una scala ancora superiore, a livello di organismi pluricellulari complessi, la comunicazione interindividuale assume sempre più un connotato simbolico, e in termini utilitaristici costituisce una estensione dell'interfaccia sensoriale dell'individuo con l'ambiente senza la necessità di un aumento fisico dell'estensione corporea. In altri termini aumenta la conoscenza individuale dell'ambiente utilizzando le esperienze di altri individui. A questo punto ci si accorge che il termine *individuo* non è poi tanto adeguato, considerando che la conoscenza è fortemente condivisa: si tratta piuttosto di un nodo in una rete in continuo mutamento.

Ovviamente la rappresentazione sensoriale dell'ambiente è un fatto *privato* conseguente lo stato d'attivazione della propria rete neuronale e non può quindi essere conoscibile dall'esterno. Questo stato d'attivazione interno può però raggiungere l'esterno mediante gli effettori di cui dispone l'organismo (*comportamento*): movimento e secrezione di sostanze chimiche più o meno volatili. La parola è una modalità motoria molto sofisticata, ma la mimica e la gestualità corporea non sono da meno. In questo caso la comunicazione si realizza tramite simboli, codifiche delle sensazioni provate, che una volta espressi diventano parte dell'ambiente: diventano fatti, fenomeni percepibili da altri individui equipaggiati per decodificarli, i quali possono così farsi un'idea della percezione sensoriale altrui e quindi di una parte dell'ambiente non individualmente esplorato e percepito. E perché una comunicazione simbolica sia efficace è necessario che abbia un alto grado di univocità (non generi fraintendimenti).

La comunicazione simbolica umana è espressa tramite:

- Mimica e gestualità: comunicazione veloce, ma molto riduttiva e limitata prevalentemente a stati emotivi o a segnalazioni di eventi ambientali isolati. Affine, sebbene ancora più fondamentale e primitiva, è la comunicazione secretoria–escretoria (sudorazione, ferormoni), operata dal sistema

nervoso vegetativo anziché da quello somatico. Si tratta di comunicazioni non volontarie e non coscienti, tranne, per la sola mimica e gestualità, per individui appositamente addestrati (es. attori, giocatori d'azzardo) e comunque con efficacia variabile.

- Disegno: comunicazione rapida ma approssimativa, riduttiva, ambigua, dipendente fortemente dal contesto (un cerchio può rappresentare il sole, un piatto o una ruota a seconda del contesto).

- Parola: scritta o pronunciata, comunicazione mediata da regole linguistiche locali, più dettagliata, descrive meglio i fenomeni temporali che quelli spaziali, ancora dipendente dal contesto seppur in misura minore dei disegni.

- Matematica: per quanto la diatriba se questa sia una *scoperta* o *un'invenzione* non sia ancora chiarita tra i matematici, da neurofisiologi reputiamo che questa sia una modalità di *comunicazione* fortemente mediata da cultura specifica, molto precisa (tanto da essere spesso confusa con la realtà fisica), poco dipendente dal contesto, e inadatta a comunicazioni emotive. La capacità umana d'isolare uno o più oggetti o eventi, e la necessità di comunicare questa esperienza in modo simbolico, inizialmente con la conta delle dita, è probabilmente il fondamento della simbologia numerica e della matematica; con buona pace di chi pensa che i numeri esistano indipendentemente dall'Uomo che li utilizza. Da esperimenti con riflessi condizionati si nota che molte specie di animali, anche pesci, sono in grado di distinguere gruppi di oggetti o simboli in base alla loro *numerosità* anche con piccole differenze, indipendentemente dalla loro distribuzione spaziale, in linguaggio umano si potrebbe dire che *contano,* ovviamente senza concetti matematici.

- Si pensa che la capacità di comunicazione linguistica così sofisticata nella specie Sapiens sia stata un elemento determinante nella competizione con le altre specie Homo per i vantaggi che ha prodotto nell'organizzare i comportamenti cooperativi. Ma la capacità di utilizzare simboli della realtà per la comunicazione intraspecifica non appartiene solo all'uomo: osservazioni su specie molto meno evolute, addirittura su insetti sociali (danza delle api) lo confermano. A questo proposito è bene ricordare che anche negli umani la comunicazione simbolica mimica non necessita di consapevolezza, anzi nella maggioranza dei casi è del tutto automatica e sicuramente è comparsa evolutivamente molto prima del linguaggio.

A conclusione di questo capitolo può essere interessante notare come lo sviluppo della comunicazione simbolica vada di pari passo con la capacità d'imitazione che alcune specie di animali (uccelli, mammiferi) dimostrano, e che nella specie umana costituisce forse il principale mezzo di apprendimento individuale. Essere buoni imitatori costituisce sicuramente un vantaggio evolutivo, in quanto consente un rapido apprendimento di comportamenti utili senza dover procedere per tentativi ed errori come invece avviene quando si producono comportamenti innovativi personali. Questo è confermato dal trasferimento intenzionale culturale tra scimmie.

Da questo punto di vista il comportamento *seguire la moda* tipico degli umani più giovani, che può superficialmente apparire dispendioso e insulso, potrebbe invece costituire un potente segnale per la selezione sessuale perché starebbe ad indicare: "Sono un buon imitatore, accoppiati con me, avremo una prole con buone capacità d'imitazione e apprendimento". Il decadere di questo comportamento

con l'età, per il dispendio di risorse che comporta, potrebbe confermare la sua valenza specifica a fini procreativi.

C'è un però un lato oscuro nell'apprendimento per imitazione. Il comportamento nei mammiferi meno evoluti dell'uomo è quasi completamente ereditato geneticamente, e sappiamo che è più o meno stabile da molti milioni di anni (gli esempi di trasferimento culturale nelle scimmie antropomorfe sono molto ridotti e riguardano prevalentemente le modalità di caccia e alimentazione). Negli umani viceversa il comportamento è prevalentemente appreso, nel bene e nel male. Questo fa si che, se le risorse ambientali diminuiscono e la densità di popolazione aumenta, è possibile che, per imitazione dei più violenti ed egoisti, i comportamenti antisociali crescano pericolosamente. Molte guerre hanno in questo la loro motivazione, peraltro comprensibile sul piano della selezione evolutiva (il più adatto sopravvive). Ma se, come sembra, la selezione naturale attualmente non limita più efficacemente la riproduzione degli individui meno dotati fisicamente e mentalmente, i figli di questi non solo probabilmente saranno anch'essi meno dotati, ma inoltre è possibile che apprendano anche comportamenti inadeguati dai loro genitori. Al peggio non sembra ci sia fine, ma a guardar lontano questa probabile trasformazione da sapiens ad insipiens potrebbe resettare il sistema, la cultura sparire (internet dà una mano) e ripartire con sane competizioni fisiche e intellettuali.

15. SISTEMI NERVOSI

In questo capitolo ripercorriamo sinteticamente le tappe evolutive che hanno prodotto un cervello cosciente. L'organizzazione del sistema nervoso che proponiamo ha aspetti innovativi rispetto alla descrizione tradizionale, presentata come consolidata in tutti i testi di neurofisiologia, ma spesso inconcludente per quanto riguarda il suo funzionamento. Abbiamo sviluppato questa visione dopo aver constatato le incredibili proprietà manifestate dai modelli connessionisti di reti neurali artificiali apparsi in letteratura negli anni 90 e successivamente confermata dai risultati dei nostri esperimenti iniziati in quegli anni, che verranno illustrati nella seconda parte di questo libro. Per comprendere il funzionamento del sistema nervoso riteniamo che sia indispensabile capire la potenza di questi modelli artificiali, anche senza entrare nei dettagli tecnici.

Come verrà spiegato in seguito, la funzione di un singolo **neurone artificiale** è estremamente semplice, è un dispositivo matematico che esegue una somma algebrica o altre funzioni semplici sui valori numerici presentati contemporaneamente in alcuni canali d'ingresso, e distribuisce il risultato su alcuni canali in uscita che lo moltiplicano per valori caratteristici dei singoli canali, imitando in questo modo pur molto riduttivamente il funzionamento di un neurone biologico. Quando una moltitudine di questi neuroni viene connessa a formare una rete opportunamente cablata (vedremo come) compaiono funzioni collettive estremamente sofisticate. In termini molto generali una rete neurale artificiale è un *trasformatore universale adattivo*: può convertire segnali in ingresso in altri segnali in uscita utili per pilotare effettori, per riconoscere e catalogare quanto viene proposto in ingresso (un'immagine, una sequenza temporale, un insieme di dati correlati, un segnale nascosto nel rumore, ecc.), o per modificare la sua stessa costituzione e il suo funzionamento. Nelle prime applicazioni questi sistemi sono stati assemblati progettando accuratamente le modalità di connessione e le funzioni matematiche dei singoli neuroni, e questo ha permesso di comprenderne le enormi potenzialità pratiche in ambito diagnostico, previsionale e di controllo meccanico; ma sul piano della modellistica biologica solo l'utilizzazione di procedure informatiche evolutive, analoghe a quelle biologiche, che automaticamente e progressivamente ne implementano l'architettura (*connessionismo evolutivo*), ha fatto comprendere come siano comparsi i primitivi sistemi nervosi e come si siano potuti evolvere da quello di un lombrico a quello dell'uomo.

È facile immaginare una semplice rete neuronale biologica che effettua un riflesso di evitamento. Alcuni neuroni nel midollo ricevono segnali da sensori nella cute di una mano che si avvicina al fuoco, a loro volta questi neuroni eccitano altri neuroni del midollo collegati ai muscoli flessori del braccio, e ne inibiscono altri collegati ai muscoli estensori, con il risultato che il braccio si flette rapidamente e la mano si allontana dal fuoco. Questo semplice sistema neuronale trasforma una sensazione in

movimento utile. Si può costruire a tavolino un sistema artificiale a tre neuroni che attua perfettamente questo riflesso; oppure si può lasciare che questo sistema si strutturi spontaneamente per prove ed errori, evolvendo da una rete di alcuni neuroni in connessione casuale. Molte *mani artificiali* si bruceranno, ma prima o poi comparirà un sistema che eseguirà perfettamente il compito. Comprendiamo che non sia facile accettare che reti neurali artificiali possano evolvere e raggiungere capacità di riconoscimento e classificazione di stimoli ambientali complessi per agire correttamente nell'ambiente, come quelle biologiche, e ancora più difficile è accettare che sistemi di questo tipo permettano di formulare previsioni, pensieri, e addirittura possano manifestare consapevolezza; ma questo è stato verificato sperimentalmente ed è l'oggetto di questo libro. Raccomandiamo di affrontare i successivi capitoli con mente aperta: l'organizzazione generale del sistema nervoso è comprensibile e non misteriosa. Non pretendiamo di aver raggiunto la conoscenza completa del funzionamento del sistema nervoso umano, ma la strada è sicuramente questa.

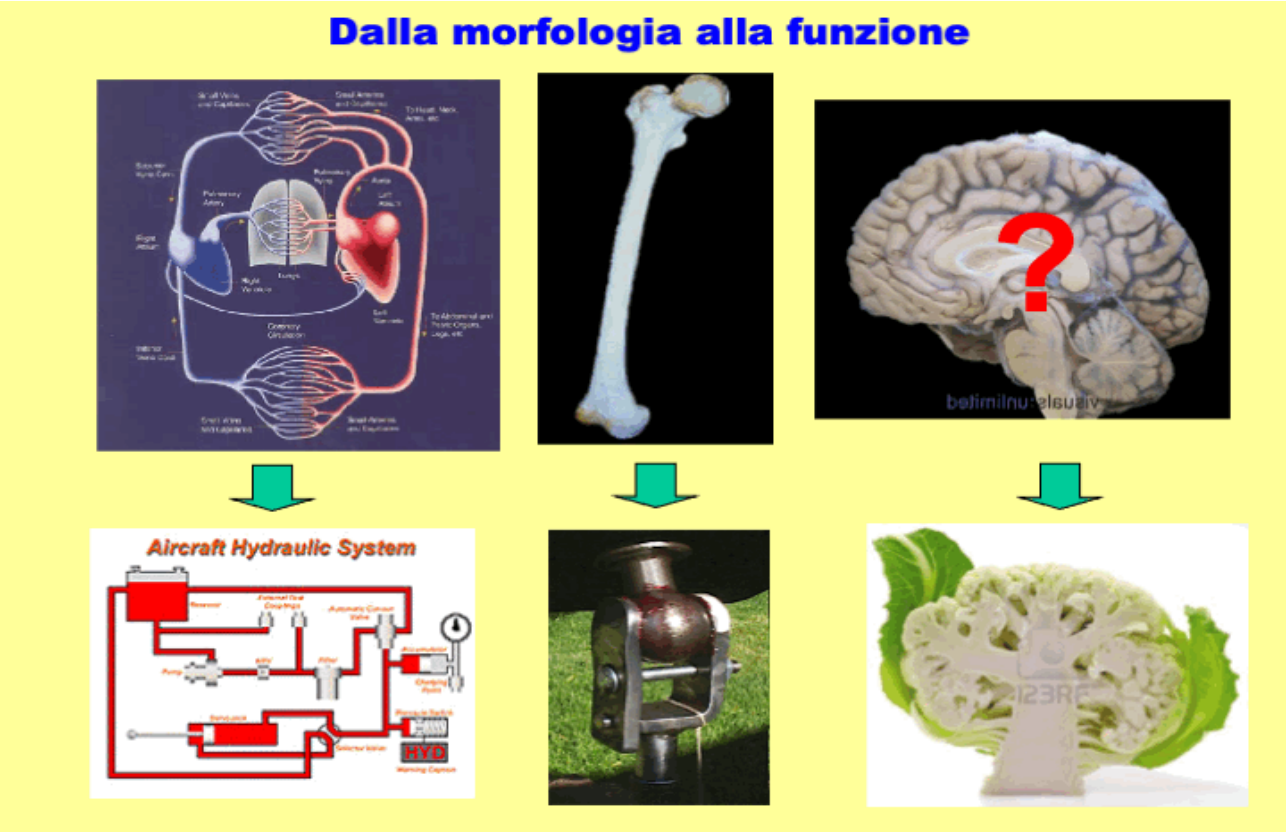


Fig. 25. Forma e funzione.

Questo non vuole essere un capitolo di neurobiologia, poiché già esiste una tale moltitudine di ottime pubblicazioni, a carattere scientifico o divulgativo, che pensare di condensarle in poche pagine sarebbe oltraggioso oltre che arduo. Cercheremo soltanto d'indirizzare l'attenzione del lettore su alcune considerazioni di carattere generale riguardanti il funzionamento del sistema nervoso di animali evoluti come i mammiferi; considerazioni che talvolta è difficile cogliere in pubblicazioni ben più autorevoli perché seppellite da una quantità d'informazioni dettagliate, morfologiche e funzionali, che

allontanano da una visione d'insieme. Potrà sembrare sconcertante, ma se si domanda agli addetti ai lavori, neurologi, neurofisiologi, psicologi, e psichiatri: "come funziona il sistema nervoso?", nella maggior parte dei casi ancora oggi la risposta è: "non lo so", con un'aria interrogativa che suggerisce: "lo saprò mai?".

È imbarazzante che il connessionismo, ipotizzato più di 50 anni fa per spiegare il funzionamento del sistema nervoso sia stato subito utilizzato in campi molto lontani dal mondo biologico, nel campo finanziario, commerciale, diagnostico etc., ma non compaia affatto negli attuali testi di neurologia che non forniscono ancora nessuna spiegazione del funzionamento globale del sistema nervoso. Sembrano tutti fermi al dettaglio del funzionamento del **singolo** neurone e non propongano nessuna ipotesi sul funzionamento di una **rete** di neuroni.
Osservando il cervello ci troviamo davanti ad una struttura morfologicamente molto strana, la cui forma macroscopica, quasi un cavolfiore, non illumina minimamente sul suo funzionamento, come invece avviene per altre strutture anatomiche come le articolazioni, il cuore ed i polmoni, ove la similitudine con giunti, pompe e mantici è lampante (Fig. 25). Dunque, se la forma macroscopica non ci aiuta, da dove si può partire per ipotizzare il funzionamento di questa struttura?

Conoscere la morfologia e il funzionamento delle singole cellule componenti il sistema nervoso è stato sicuramente determinante. Più di un secolo di studi al microscopio, più di mezzo all'oscilloscopio, e una trentina d'anni di simulazioni informatiche, ci hanno svelato molto a questo livello, e le conoscenze raggiunte sono state fondamentali per costruire nuove teorie sul funzionamento dell'intero sistema nervoso (Fig. 26).

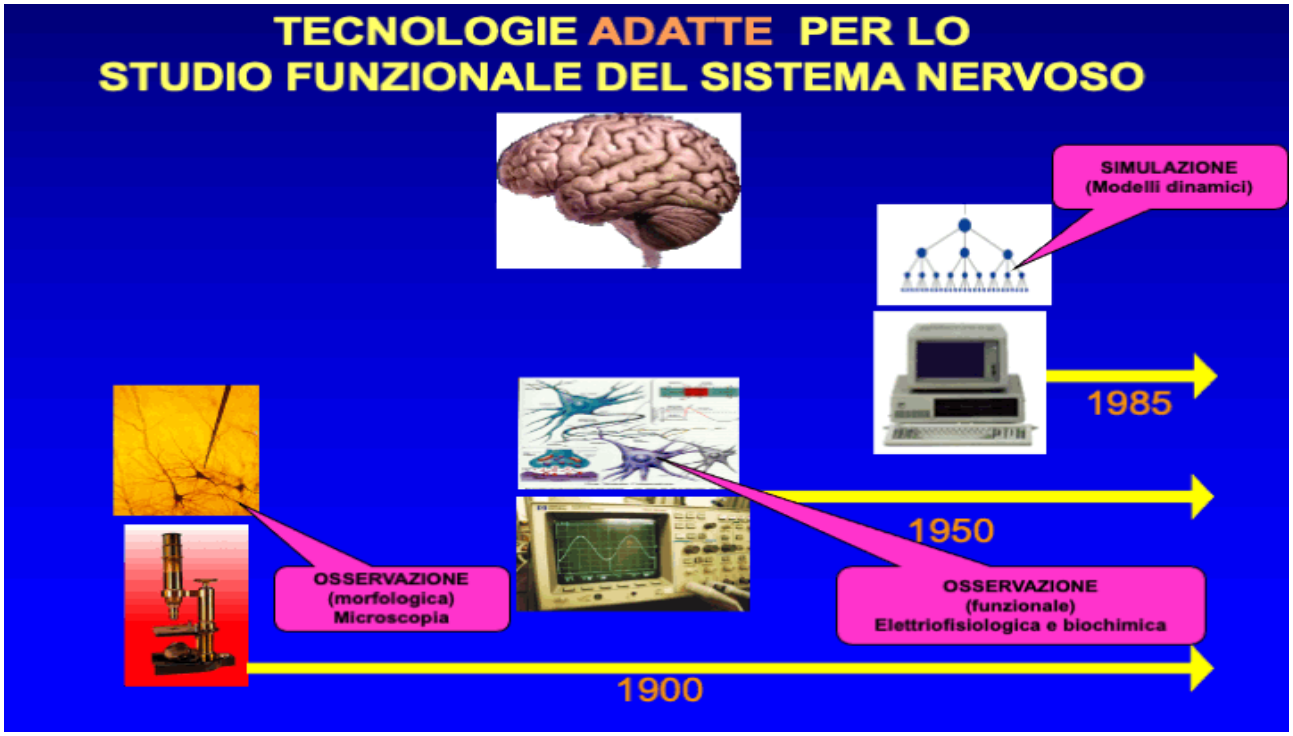


Fig. 26. Tecnologie per lo studio del sistema nervoso.

Innanzitutto, *perché* esiste un sistema nervoso? Le piante e molti animali primitivi non hanno sistema nervoso, e tuttavia vivono e si moltiplicano tranquillamente già da molti milioni di anni prima della comparsa di animali con reti neuronali. Qual è quindi il motivo dell'evoluzione di un sistema nervoso, anche del più semplice, come quello delle meduse e dei vermi? A rispondere davvero sinteticamente: *per cercare nutrienti e cercare di non diventare nutrienti*. Più specificamente, per far comunicare rapidamente e più efficacemente strutture sensoriali con strutture motorie. Ma prima ancora: perché questa necessità di strutture motorie, o più brevemente di spostamento? L'evoluzione favorisce tutti i meccanismi che migliorano il raggiungimento di nutrienti. Le piante e alcuni animali sessili (spugne) non si spostano, raccolgono nutrienti dal terreno o dalle correnti marine; ma certo è più vantaggioso andare a cercare nutrienti dove sono più abbondanti e ricchi, e allora sensori specializzati e organi di movimento sono utili. Alcuni nutrienti, poi, si muovono a loro volta spontaneamente (prede), ed allora l'esplorazione ambientale e la risposta motoria rapida diventano indispensabili: di qui l'importanza di un rapido flusso informativo dai sensori agli effettori attraverso una rete specializzata di comunicazione. E come abbiamo detto, l'individuazione di nessi causali negli eventi ambientali percepiti costituisce un notevole vantaggio per la sopravvivenza e riproduzione.

I piccolissimi animali mono o paucicellulari non necessitano di questa rete, perché le modificazioni umorali interne prodotte dall'interazione con l'ambiente possono rapidamente raggiungere e influenzare i vicinissimi meccanismi motori (flagelli, ciglia vibratili) e comunque gli spostamenti saranno molto piccoli; ma quando l'individuo è costituito da milioni o miliardi di cellule, e le dimensioni del corpo aumentano e conseguentemente le capacità di movimento, una rete di comunicazione sensori-motoria diventa essenziale e compaiono le cellule dedicate a questo scopo che sono chiamate neuroni. Le peculiarità di queste cellule sono principalmente due:

- la forma, un corpo cellulare di piccole dimensioni (alcuni micron) simili a quelle delle altre cellule che costituiscono l'organismo, ma con prolungamenti anche molto estesi (anche alcuni metri negli animali più grandi come le balene).

- e l'eccitabilità, con la capacità di trasmettere velocemente a distanza, lungo questi prolungamenti, un potenziale elettrico transiente e ripetitivo (un treno d'impulsi a frequenza variabile), che costituisce un veloce ed efficace sistema di comunicazione interna.

Questo segnale si propaga lungo le diramazioni della cellula con modalità molto raffinate che minimizzano il consumo di energia, ottimizzano la velocità di propagazione, e garantiscono la correttezza dell'informazione utilizzando la modulazione della frequenza degli impulsi piuttosto che dell'ampiezza. Le altre cellule in contatto (sinaptico) possono essere influenzate dall'arrivo di questi impulsi attraverso un mediatore chimico locale, che li trasforma in segnali eccitatori (depolarizzazione) o inibitori (iperpolarizzazione) a seconda dei recettori utilizzati. E queste possono a loro volta propagare o meno altri impulsi dello stesso tipo ad altri neuroni o attivare degli effettori motori o secretivi. C'è da rimanere stupefatti: trasmissione selettiva rapida e sicura di microscopici campi elettrici a lunga distanza e attivazione chimico–meccanica dove questa è richiesta. Per un ingegnere della comunicazione potrebbe essere sorprendente che tutto questo sia frutto di ciechi meccanismi evolutivi, ma in effetti è così.

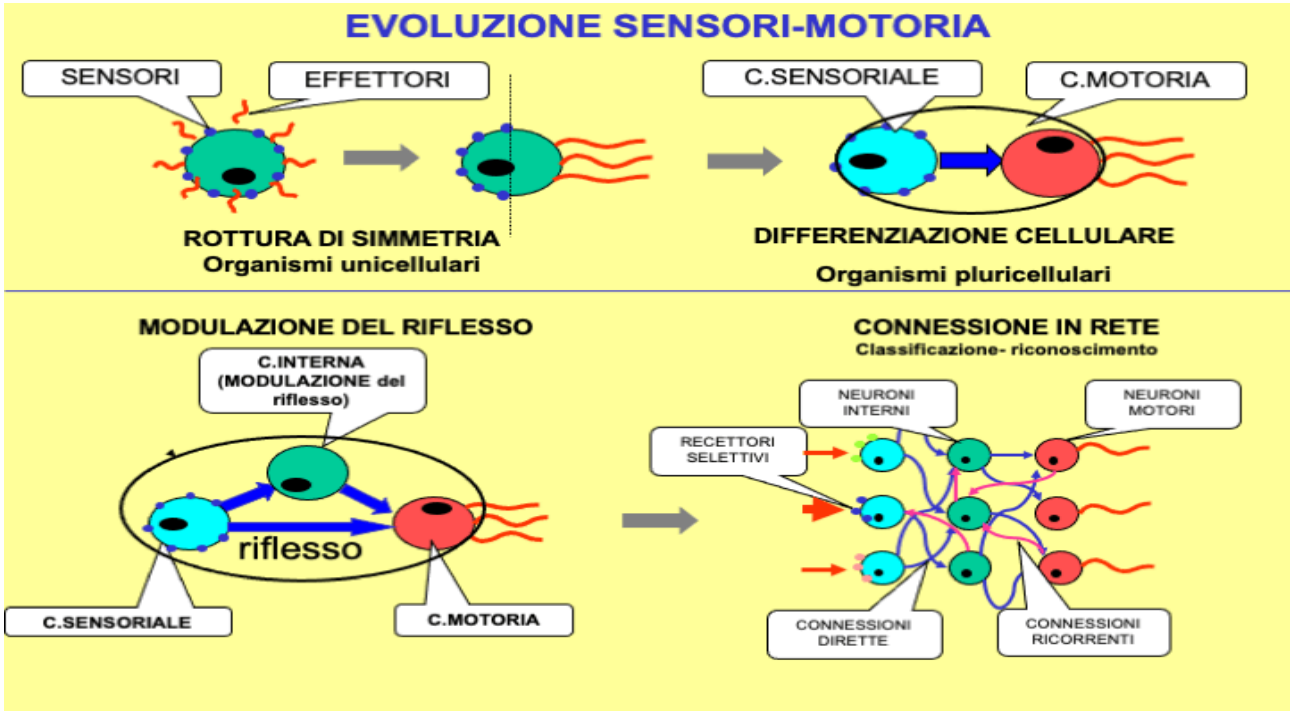


Fig. 27. Evoluzione sensori-motoria.

Un'ipotesi sull'evoluzione del sistema nervoso (Fig. 27) è quella che attribuisce l'origine del sistema nervoso ad una rottura della simmetria sferoidale dei primitivi organismi unicellulari, con la separazione di un polo sensoriale ed un polo motorio, presenti in organismi unicellulari più evoluti (flagellati), e successivamente in organismi pluricellulari, con una netta separazione dei compiti: alcune cellule deputate ad attività sensoriali sempre più specifiche, ed altre cellule deputate ad attività motorie e secretive, necessariamente collegate alle prime. Di seguito, la comparsa progressiva di cellule interne o intermedie, non direttamente collegate con sensori od effettori, ma con le cellule ad essi collegate e fra loro, ha permesso la modulazione delle risposte riflesse. La risposta comportamentale in questo caso può essere pilotata sia dalle afferenze sensoriali attuali che dallo stato interno del sistema (genericamente la memoria che il sistema ha sviluppato). Se la risposta comportamentale è pilotata prevalentemente dalle afferenze sensoriali si parla di *riflesso*; se invece è pilotata prevalentemente dallo stato neuronale interno si parla di *intenzionalità* e nell' uomo questo modo di agire è definito *mentale*.

Per varie migliaia di anni l'idea che un sistema materiale fisico, un corpo, potesse prendere una decisione cosciente è apparsa impossibile e la strada più semplice è stata quella di demandare le decisioni ad una entità immateriale (anima) misteriosamente presente nel corpo e di derivazione divina. Più recentemente si è parlato di mente, meno divina ma sempre immateriale. Oggi possiamo mantenere il termine mente, definendolo però come *l'effetto del funzionamento* di un sistema fisico evoluto con struttura complessa nei termini che abbiamo già descritto. Come abbiamo detto la *mente* è una funzione e non è localizzabile *dentro* il cervello.

Ma cosa si comunicano i neuroni? Ciecamente solo il rispettivo stato d'attivazione. Siamo molto lontani dalla similitudine proposta con sistemi di comunicazione come la rete telefonica o internet, dove è importante che il segnale, ricco d'informazione, rimanga intatto e stabile pur attraversando numerosi nodi. Nel sistema biologico un segnale povero d'informazione si modifica e modifica tutti gli altri in ogni nodo della rete e in questo modo produce risultati efficaci per l'organismo. Che modo di funzionare è questo? Per rispondere a questa domanda è necessario porsene un'altra: cosa fa il sistema nervoso?

Genera risposte secretivo–motorie a stimoli interni e ambientali, più o meno differite nel tempo, utili alla sopravvivenza dell'individuo. In termini informatici trasforma l'insieme di afferenze sensoriali esterne e interne (inclusa la memoria) in comportamenti motori e/o secretivi. Per ritornare alla supposta analogia con una rete telefonica, è come se mettessimo la cornetta del telefono sotto la pioggia e un apparecchio, ricevendo il rumore di questa, aprisse l'ombrello. Non che non si possa costruire qualcosa di simile, ma questa appunto è la differenza con una normale rete telefonica.

La comparsa e lo sviluppo del sistema nervoso sembrano dunque essere dovuti alla pressione evolutiva verso l'aumento di conoscenze dell'ambiente circostante, in particolare i nessi causali tra gli eventi percepiti, e la conseguente utilizzazione di questi dati a fini comportamentali più efficaci per la vita e riproduzione. Questo fatto generalmente non viene preso nella giusta considerazione nello studio dei sistemi nervosi evoluti come quello umano, con la conseguenza di descrivere minuziosamente l'anatomia delle strutture periferiche, midollari ed encefaliche, di studiare alcuni meccanismi neurofisiologici più semplici come i riflessi sensori-motori, ma di non riuscire poi ad affrontare lo studio neurofisiologico dei meccanismi cognitivi superiori. Di fatto ancora oggi il funzionamento di alcune parti del sistema nervoso, come la corteccia cerebrale, anche se minuziosamente descritta istologicamente, resta in buona parte un mistero anche per gli addetti ai lavori. A nostro parere questa è una conseguenza del fatto che continuano ad essere adoperate metodologie di studio inappropriate a questo livello. E si tende a trascurare la peculiarità delle strutture corticali umane che ne hanno fatto la specie dominante e più invasiva sul pianeta per le capacità continuamente adattive alle variazioni ambientali. Le reti neuronali corticali, in particolare quelle prefrontali, sono macchine adattive per eccellenza che modificano continuamente e velocemente le loro connessioni e quindi il loro funzionamento in conseguenza delle retroazioni sensoriali del comportamento prodotto.

Il mio cervello (e anche il vostro) di un minuto fa è diverso da quello di adesso!

16. IMMAGINI STRUMENTALI CEREBRALI

Le metodologie istochimiche e neurofisiologiche sono state indispensabili per raggiungere le conoscenze che abbiamo circa il funzionamento della comunicazione neuronale, ed anche se ulteriore lavoro deve essere compiuto la conoscenza dei meccanismi generali è ormai ben consolidata. Bisogna però rendersi conto che pretendere di continuare a studiare il sistema ad un livello superiore (funzionamento della rete di neuroni) con gli stessi strumenti utilizzati per il livello inferiore (funzionamento di singoli neuroni o sinapsi) è un errore grave. Neppure l'ipotetica conoscenza dello stato elettrochimico di ogni neurone della rete sarebbe sufficiente a descrivere il funzionamento della rete nel suo complesso (cfr. cap. 27 *Il Connessionismo*). Potenziare semplicemente la tecnologia d'indagine (neuroimmagini) mantenendone la stessa metodologia (osservazione dello stato di attivazione di pochi neuroni o di grandi assembramenti di questi) è un errore ancora più grande: come pensare di comprendere quello che è scritto in un giornale di lingua sconosciuta guardandolo al microscopio.

Fig. 28. Visualizzazione dell'attività cerebrale.

Tecniche d'indagine importate dalla clinica delle malattie del sistema nervoso, come PET, TAC, MR od EEG, che hanno prodotto enormi vantaggi diagnostici per accuratezza e non invasività, propongono immagini eclatanti del cervello negli studi neurofisiologici del comportamento; ma in realtà finora non hanno aggiunto quasi nulla alle conoscenze già raggiunte attraverso l'analisi della patologia umana e le sperimentazioni (anche cruente) su animali effettuate nel secolo passato; e di fatto costituiscono un ennesimo vano tentativo di dedurre il funzionamento del sistema nervoso umano dalla forma e posizione delle aree di maggiore attivazione che contengono miliardi di neuroni. Se ci è concesso, con inevitabile disappunto di molti ricercatori, un'immagine PET o fMR evidenzia le aree cerebrali più attive durante un particolare compito; ma per il funzionamento del sistema sono tanto importanti le aree (i neuroni) attive quanto quelle inattive o addirittura inibite. Come abbiamo detto, le rappresentazioni neuronali sono una scacchiera tridimensionale e dinamica dove il *significato* è rappresentato dalla configurazione della distribuzione e numero di neuroni attivi e inattivi. E comunque, come già detto, anche ipotizzando di conoscere lo stato d'attivazione di tutti i miliardi di neuroni e delle loro connessioni, questo non farebbe comprendere il funzionamento del sistema. Sarebbe come pretendere di capire che tipi di lavoro vengono svolti in una città guardando dall'esterno quali finestre degli edifici sono accese e quali spente (Fig. 28).

Pensiamo veramente che proporre sempre più insistentemente neuroimmagini funzionali multicolori sia controproducente, perché diffondono l'idea che solo le zone brillanti siano attive, e che tutto il resto sia silente e inutile in quel contesto. Ed è anche opportuno ricordare che nel cervello la differenza di concentrazione d'ossigeno (che viene evidenziata con falsi colori nelle immagini) tra una zona attiva ed una spenta è veramente minima, dell'ordine di 1/100, sicché, per tornare al paragone con le finestre illuminate e spente, è come vedere finestre tutte illuminate con piccolissime differenze d'illuminazione. In più, un'immagine fMRI è costruita sulla media di parecchie decine di secondi di attività corticale, che, sbagliando, si suppone costante poiché conseguente a ripetuti e identici stimoli sensoriali (visivi o uditivi) o ad identiche esecuzioni motorie (ripetuti movimenti volontari di un dito). Ma l'attività corticale è in continuo mutamento per il succedersi degli stimoli sensoriali e le attivazioni interne dalla memoria, dal fluire incessante del pensiero, dall'attenzione mutevole, dall'abitudine, dal metabolismo, ecc. È come visualizzare una sovrapposizione mediata di molti fotogrammi successivi di un film e pretendere che l'immagine risultante, una macchia sfuocata, rappresenti qualcosa. E se anche in futuro la distribuzione, il pattern dinamico, di attivazioni/inibizioni potesse diventare osservabile nei minimi dettagli in ristrette zone corticali, comunque non potrebbe fornire nessuna informazione sui processi neuronali che vengono effettuati.

Bisogna smettere di pensare che la ***forma*** (la mappa) *della distribuzione dell'attività neuronale all'interno del cervello serva a capirne il funzionamento.*

L'EEG è sicuramente ancora oggi un utile esame clinico per definire patologie encefaliche accessuali (epilessia) o degenerative (demenza); ma pensare di utilizzarlo, magari aumentando a dismisura il numero di elettrodi sullo scalpo (Fig. 29), per cercare di comprendere il funzionamento delle strutture neuronali sottostanti è davvero un altro non senso. L'attività elettrica registrabile sullo scalpo è la somma dei singoli potenziali elettrici dei miliardi di neuroni sottostanti ad ogni elettrodo: una media tempo-variabile, e per di più filtrata dalle strutture resistivo-capacitive dei tessuti interposti (cellule

gliali, vasi sanguigni, meningi, osso, cute ecc.). Si potrebbe paragonare questa metodica all'osservazione notturna delle luci della città dall'alto, ma attraverso la nebbia o le nuvole, con luminosità quindi diffusa e variabile. L'unica informazione ottenibile sarebbe quella che lì sotto c'è una città in attività. Anche gli studi magnetoencefalografici (MEG) non aggiungono nulla, nonostante pretendano di visualizzare più selettivamente gli strati neuronali profondi (le cantine della città!).

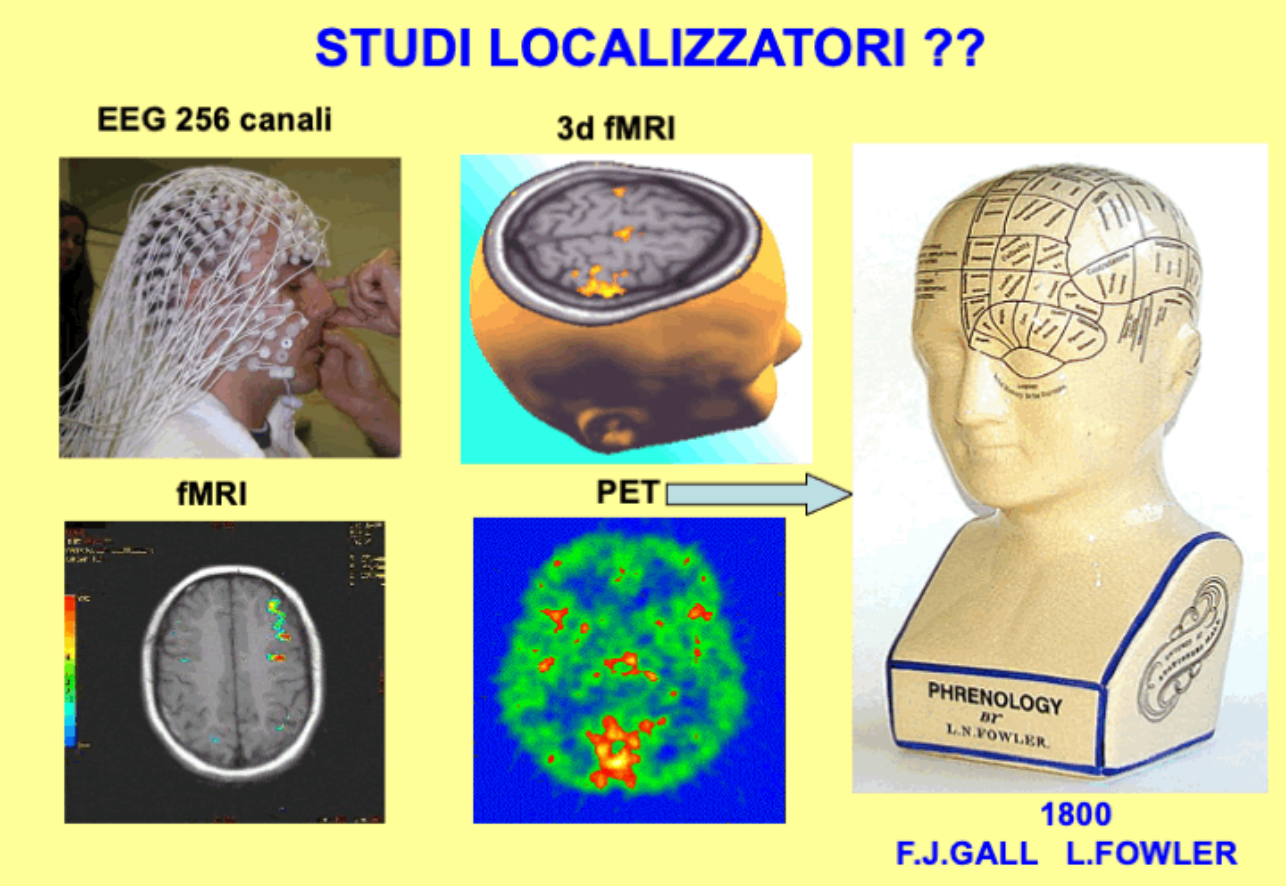


Fig. 29. Ritorno alla Frenologia?

In una rete neuronale, anche nella più semplice struttura multineuronale che genera un riflesso sensori-motorio, non è possibile individuare compiti specifici di alcuni neuroni rispetto ad altri. I modelli connessionisti fanno capire bene che questo non è possibile, neanche se i neuroni fossero 10 invece che 100 miliardi: è la rete nel suo complesso che funge da processore e memoria in modo parallelo e asincrono. Torneremo su questo argomento nel cap. 27 sulle reti neurali artificiali.

Quanto segue quindi non sarà un approssimativo riassunto delle conoscenze anatomo-fisiologiche del sistema nervoso, che, come abbiamo detto, lasciamo ad autorevoli pubblicazioni specialistiche, ma una proposta innovativa sulla sua organizzazione ed il suo funzionamento alla luce della sua evoluzione, dalle forme più semplici fino all'uomo. Ciò non toglie che sarà necessaria una descrizione un poco più che approssimativa della sua costituzione anatomica e delle sue basi neurofisiologiche (Fig. 30).

La corteccia cerebrale, evolutivamente l'ultima struttura neuronale comparsa, è una macchina adattiva *incessantemente* in funzione anche nel sonno. La costante sensorialità attuale (vista, udito etc.), oltre ad attivare reazioni motorio-secretive, già apprese geneticamente o fenotipicamente, cambia in continuazione la struttura e funzione di queste reti neuronali corticali attraverso continue e rapide modificazioni sinaptiche ottimizzando costantemente il comportamento. In particolare la corteccia prefrontale umana opera costantemente questo processo di *apprendimento* anche sulla base di memorie e immaginazioni, così diventa una **macchina adattiva anche sul futuro immaginato!**

Prima abbiamo detto che i meccanismi evolutivi su descritti operano solo nel presente, ma alcuni suoi *prodotti (H. sapiens)* riescono ad adattarsi al futuro e anche modificarlo. Strabiliante vero!

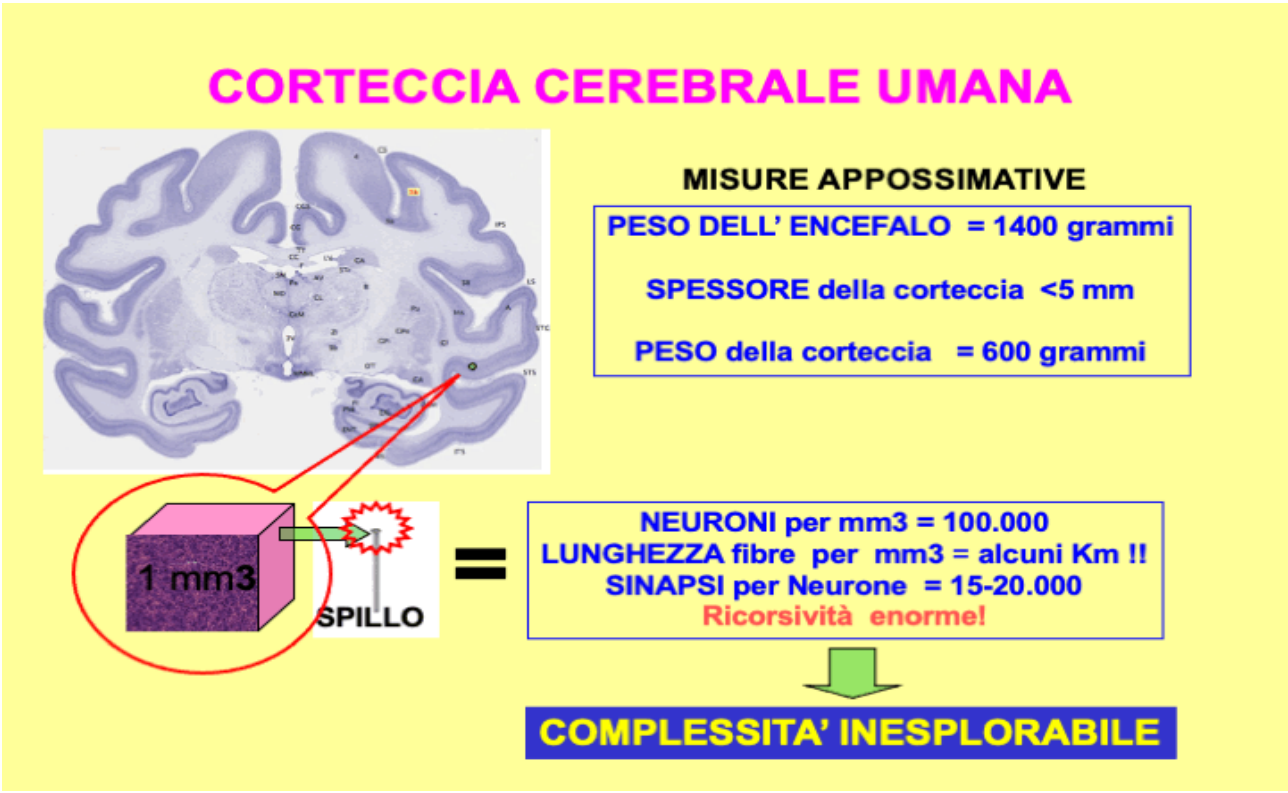


Fig. 30. Complessità della corteccia encefalica. Qualche informazione quantitativa.

Spesso nelle immagini del cervello che vengono divulgate si può avere l'impressione che la corteccia ponderalmente costituisca la maggior parte dell'encefalo; e in effetti è così, se si considerano globalmente lo strato dove sono allocati i neuroni corticali e le loro connessioni con tutte le strutture encefaliche. Ma se si considera solo la parte contenente i neuroni le cose cambiano molto. Lo strato corticale ha mediamente uno spessore di meno di mezzo centimetro, cosicché il suo peso e volume globale sono alquanto ridotti (circa 600 grammi, poco più di un terzo di tutto l'encefalo), con una densità neuronale molto elevata (circa 100.000 neuroni per mm^3, una capocchia di spillo). Il resto del volume encefalico è occupato per la maggior parte da fibre di connessione (qualche migliaio di Km per mm^3! Sì: nella capocchia di uno spillo).

Insomma, a farla breve, la maggior parte del volume di tutto l'encefalo è costituita da fibre di connessione tra neuroni, con una retroattività enorme, per non parlare della abbondante presenza di altre cellule strutturali e di nutrimento come le cellule gliali (che forse non sono solo di nutrimento). Contare poi le sinapsi tra i neuroni è un'impresa impossibile; una stima molto approssimativa è dell'ordine di 15-20 mila per ogni neurone, un groviglio inesplorabile e per di più variabile in tempi anche brevi. Questa vertiginosa complessità anatomica dovrebbe far capire che qualunque modalità d'indagine funzionale, con microelettrodi a livello cellulare o con neuroimmagini, anche con risoluzioni sub-millimetriche, non può fornire indicazioni utili sul reale funzionamento circuitale globale.

Purtroppo in quest'ottica vengono investite enormi quantità di denaro, come ad esempio nel progetto *Connectoma* che si prefigge la visualizzazione di tutte le vie di connessione tra le diverse aree cerebrali in vivo (Fig. 31). E con ciò? Sappiamo già che in pratica tutto è connesso con tutto!

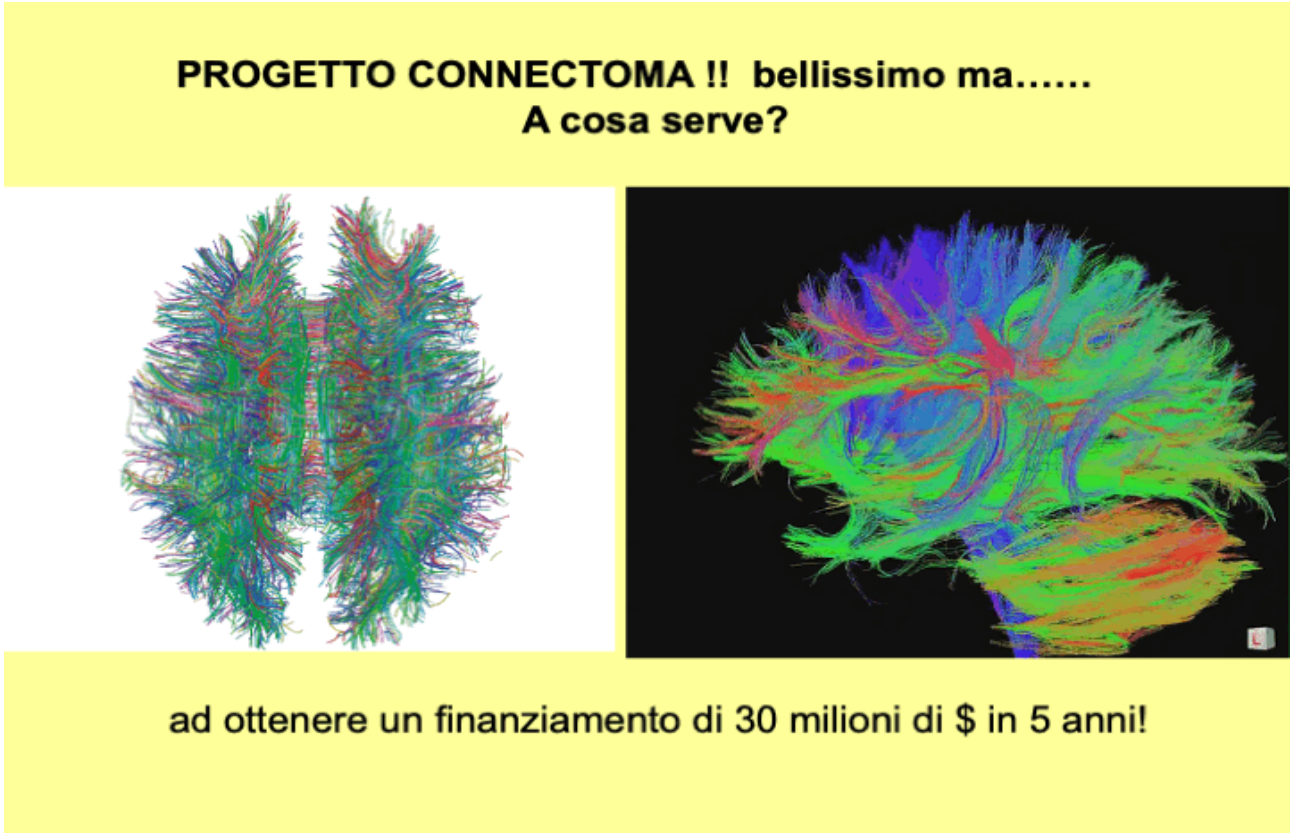


Fig. 31. Progetto Connettoma. Visualizzazione delle connessioni corticali.

Un'ulteriore valutazione numerica: approssimando (per difetto) a 100 miliardi il numero di neuroni corticali, e definendo solo due stati possibili per ognuno di essi (attivo / inattivo), il numero di combinazioni possibili, ovvero il numero di pattern globali diversi (se volete, di rappresentazioni diverse) raggiunge la cifra astronomica di 10 alla 30 miliardi! Enormemente più del numero di particelle elementari *nell'universo* visibile (stimato tra 10^{72} e 10^{87}). Ovviamente gran parte di queste diverse

combinazioni saranno ridondanti (equivalenti sul piano comportamentale), ma comunque nessuno potrà dire che siano poche.

Dunque, rinunciare a capire? No, ma affrontare il problema da un diverso punto di vista. Non cercare il dettaglio anatomico, ma valutare il miglior modello funzionale biologicamente plausibile; e quello connessionista, anche se necessariamente riduttivo, è ora sicuramente il miglior modello esistente. E non basta: non bisogna costruire il modello a tavolino secondo le proprie ipotesi di funzionamento, ma lasciare che evolva darwinianamente quando immesso in un ambiente parimenti artificiale che simula le condizioni ambientali desiderate. Chi fosse interessato a queste modalità sperimentali (*connessionismo evolutivo)* potrà trovare i dettagli operativi nel precedente nostro libro *Coscienza Artificiale* (2009), il cui riassunto si può leggere nel sito www.neurosoft.it. Più avanti comunque ne descriveremo sinteticamente la metodologia ed i risultati sperimentali.

17. ORGANIZZAZIONE DEL SISTEMA NERVOSO

In organismi primitivi forniti di un sistema nervoso relativamente semplice, come i molluschi, l'organizzazione della rete neuronale è sufficientemente nota e può essere descritta come in Fig. 32. Alcuni neuroni sono in contatto con sensori ambientali (tattili, visivi, termici, ecc.) e sono connessi a neuroni intermedi che a loro volta sono connessi con neuroni che controllano effettori motori o secretori. Questa rete trasforma lo stato d'attivazione dei neuroni sensori in uno stato d'attivazione dei neuroni motori che produce azioni e comportamenti utili alla sopravvivenza dell'individuo (trasformazione sensori-motoria); in termini comportamentali provoca riflessi sensori–motori con qualche capacità di memoria (apprendimento individuale: riflessi condizionati).

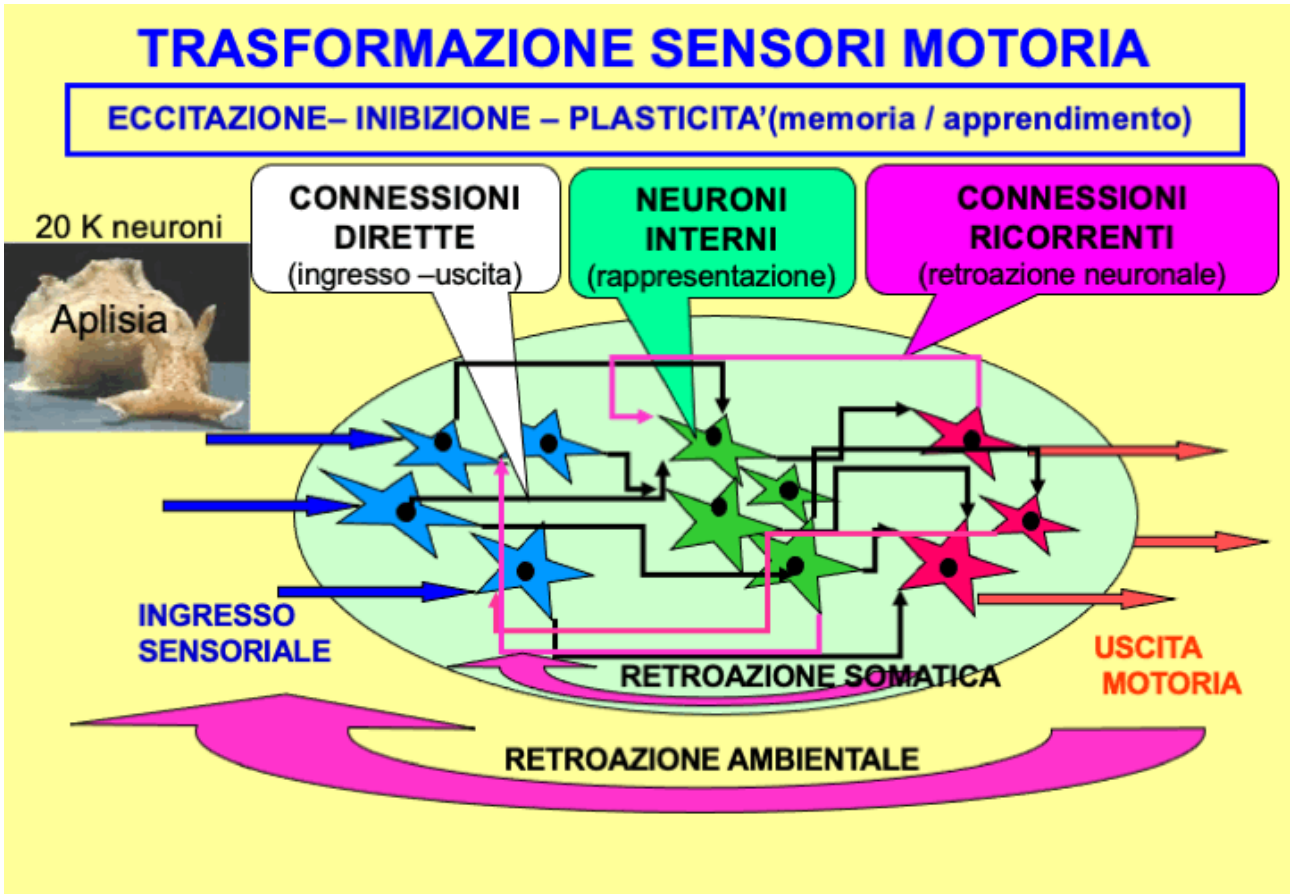


Fig. 32. Schema di rete neuronale nei molluschi.

L'ambiente terrestre è variabile con cicli brevi (giorno/notte) e lunghi (anni, glaciazioni, ecc.) con percentuali di caoticità variabili secondo la scala di osservazione. Se la variazione è ciclica, o mantiene una certa tendenza per periodi sufficientemente lunghi rispetto alla durata di vita di ogni singola specie, l'evoluzione scova economicamente meccanismi adattivi del tutto automatici ed innati (sonno e veglia, cambio del pelo stagionale, migrazioni, ecc.); ma, se il livello d'imprevedibilità è elevato alla scala operativa del singolo individuo, allora l'evoluzione seleziona strumenti (organi e comportamenti) che assicurano la migliore previsione del futuro utile alla propria sopravvivenza e riproduzione.

Per prevedere lo spostamento di una preda, o un improvviso cambiamento meteorologico, o la propagazione di un incendio, è necessario conoscere al meglio la situazione presente, e confrontarla con situazioni passate più o meno simili; è necessaria quindi una memoria individuale di nessi causali sugli eventi (apprendimento fenotipico), che non è invece affatto richiesta quanto il comportamento è del tutto riflesso verso situazioni geneticamente ben note (stagioni = cambiamenti della pelliccia, migrazioni, ecc.).

Cablaggi congeniti efficaci delle reti neuronali

Abbiamo detto che le reti neuronali si sono evolute per operare efficacemente trasformazioni sensori-motorie. L'evoluzione spinge lo sviluppo dei sistemi sensoriali a distinguere al meglio le modificazioni ambientali utili per ottimizzare il comportamento motorio.

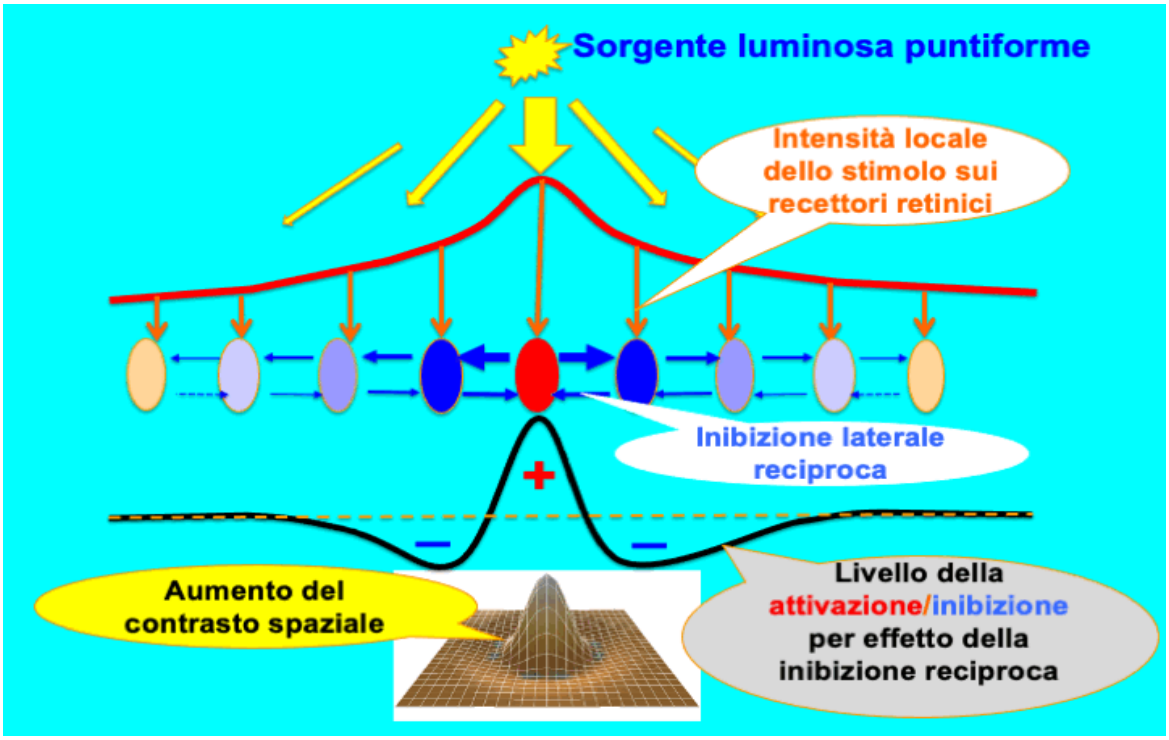


Fig. 33. Inibizione laterale nella retina.

In ogni rete eccitabile, biologica o artificiale che sia, devono essere presenti meccanismi inibitori oltre che eccitatori, altrimenti ogni minima stimolazione locale proveniente dai sensori produrrebbe a cascata uno stato di eccitamento massimale su tutti i nodi della rete impedendo qualunque distinzione tra le diverse modalità di stimolazione e non sarebbe possibile nessuna *rappresentazione* degli eventi. Ovviamente questa inibizione deve essere circoscritta e correlata allo stato e zona di attivazione con intensità adeguata a non spegnere tutta l'attività della rete. In sintesi, la stimolazione proveniente dall'ambiente e dalle retroazioni interne alla rete viene utilmente circoscritta dall'inibizione. Questa configurazione di tipo concentrico (spaziale o funzionale) assicura che la rete non sia mai in uno stato di saturazione attiva o di totale quiete ma sia sempre pronta a "rappresentare" configurazioni adeguate agli stimoli in arrivo. La figura 33 visualizza in modo schematico lo stato di attivazione/inibizione (rosso/blu) di una ipotetica catena lineare di neuroni eccitabili ognuno dei quali invia connessioni inibitorie ai propri vicini. L'effetto delle connessioni inibitorie è proporzionale allo stato di attivazione di ogni neurone: più un neurone è eccitato più inibisce i propri vicini. Se ipotizziamo che questi neuroni siano recettori sensibili alla luce, come avviene nella retina, uno stimolo luminoso puntiforme distribuirà la sua energia sui neuroni secondo il profilo a campana della linea rossa, quindi ecciterà maggiormente i neuroni in prossimità del centro illuminato e progressivamente sempre meno quelli più lontani. Parimenti l'effetto inibitorio sui neuroni vicini sarà molto efficace per i neuroni centrali e sempre meno per quelli più distanti (frecce blu più o meno spesse). L'effetto globale sarà quello di concentrare l'eccitazione sui neuroni centrali, di distribuire la massima inibizione su quelli di contorno, e di nessun effetto su quelli più lontani, come descritto dal colore dei singoli neuroni e dalla curva blu che rappresenta il loro stato di attivazione. Questa configurazione circoscrive la zona più stimolata esaltandone la differenza con le zone di contorno. Se si immagina questa organizzazione su un piano bidimensionale di neuroni interconnessi si realizza un filtro a *cappello messicano*, come l'immagine in basso nella figura, che rende bene la funzione di esaltazione di contrasto.

Questo funzionamento configura un sistema d'inibizione laterale, ben noto a livello retinico e cutaneo, che, oltre alla su citata azione d'impedire la diffusione indiscriminata dell'eccitazione a tutte le strutture neuronali collegate, ha la funzione di esaltare i contrasti di stimolazione nello spazio e nel tempo. Si sviluppa quindi automaticamente un sistema di rilevamento degli stimoli più differenti dallo sfondo e dallo stato sensoriale precedente, un ottimo filtro insomma che, oltre alle precedenti funzioni, riduce e comprime la quantità d'informazione che influenza le reti neuronali di livello successivo (ad es. nell'uomo l'attività di 150 milioni di recettori retinici è convogliata in 1 milione di fibre del nervo ottico, quindi con una compressione spaziale e informativa di 150 a 1). Altro sistema efficace per esaltare i contrasti è quello di una *amplificazione esponenziale*, per cui stimoli forti sono amplificati maggiormente di quelli deboli (Fig. 34).

In generale in strutture biologiche particolarmente dedicate all'analisi sensoriale si riscontrano delle funzioni di attivazione (lineari, sigmoidi, esponenziali ecc.) paragonabili a quelle di unità di reti neurali artificiali che emergono spontaneamente quando sottoposte ad evoluzionismo artificiale. Insomma, ove possibile, i meccanismi evolutivi scovano assemblaggi neuronali che ottimizzano i risultati con massima efficienza e velocità e minimo dispendio di energia grazie ai meccanismi di *sopravvivenza differenziale* sempre in funzione.

Nel cap. 14 *Comunicazione* abbiamo osservato il processo evolutivo dei sistemi di comunicazione cellulare. Nella stratificazione evolutiva delle strutture del sistema nervoso pensiamo si possa cogliere lo stesso processo: diffusione locale (contatto), diffusione a distanza (ormonale), connessione selettiva a distanza (neuronale).

Nelle primitive reti neurali delle meduse o degli anellidi stimoli ambientali in contatto con alcune zone del corpo innescano appropriate reazioni motorie senza necessità di un controllo centralizzato. Probabilmente a questo livello due soli neurotrasmettitori sinaptici sono sufficienti, un eccitatore e un inibitore; e questo corrisponde a quanto si trova nel sistema nervoso periferico umano, ove i due neurotrasmettitori sono la noradrenalina e l'acetilcolina.

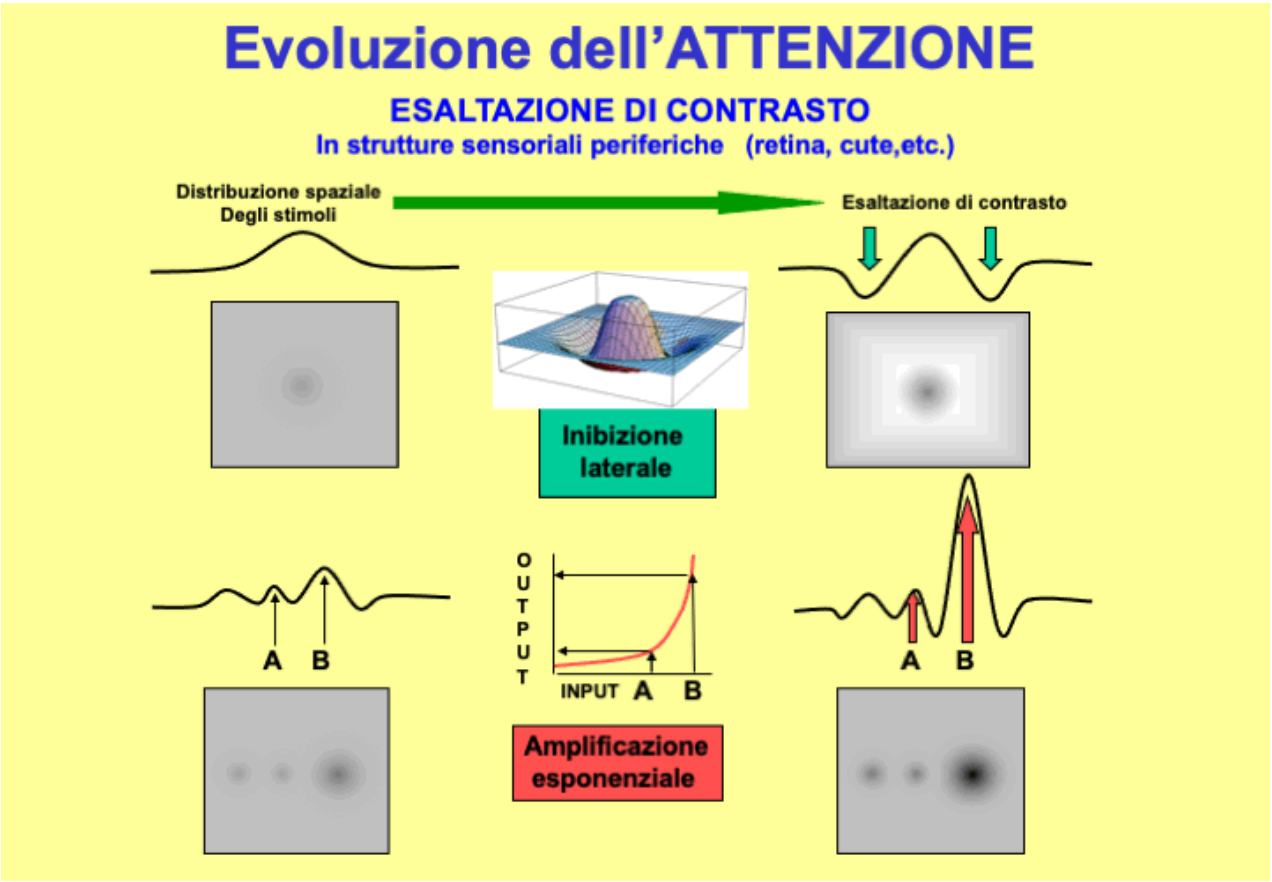


Fig. 34. Modalità di esaltazione di contrasto spaziale in strutture neuronali periferiche.

Quando in animali più complessi iniziano a comparire strutture troncoencefaliche che integrano le attività sensoriali si osserva la comparsa di una moltitudine di neurotrasmettitori diversi, con addirittura funzioni diverse a seconda dei diversi recettori allocati sui neuroni riceventi. A questi livelli (nuclei troncoencefalici, mesencefalici e della base) non si trova una precisa architettura neuronale come si trova nel cervelletto, nell'ippocampo e nella neocorteccia. Questa modalità di comunicazione interneuronale assomiglia ad un meccanismo di comunicazione diffusivo ormonale locale, basato su affinità molecolari tra trasmettitori e ricevitori.

Al contrario le strutture neuronali più recenti, cervelletto ippocampo e neocorteccia, manifestano una ben definita e dettagliata architettura cellulare (citotettonica), con specificità di localizzazione e connessioni, tanto che un bravo istologo può capire quale porzione di corteccia sta osservando al microscopio dalla forma e disposizione dei neuroni che osserva. E qui il numero di neuro trasmettitori torna a diminuire notevolmente (ad oggi risultano solo un eccitatore, glutammato, ed un inibitore, GABA) in quanto la selettività della comunicazione è ottenuta tramite selettività di collegamento fisico tra i neuroni piuttosto che selettività tra mediatori e recettori.

18. PERCHE' UNA MENTE

Il movimento è stato una delle prime caratteristiche della vita biologica presente anche in organismi unicellulari, se non altro come possibilità di modificazioni plastiche della loro forma a seguito di reazioni chimiche all'interno e all'esterno del corpo. Ma quando i processi evolutivi hanno prodotto animali multicellulari, la gestione del movimento di parti sempre più distanti ma tra loro correlate ha determinato la comparsa di un sistema di controllo sensori-motorio appositamente dedicato. Che inizialmente si è configurato come una rete di cellule reattive (neuroni) in grado di comunicare il loro stato di attivazione o meno a tutte la altre connesse in rete. Progressivamente questa rete neuronale presente negli anellidi, è evoluta in un sistema nervoso vero e proprio con gangli e reti dedicate a particolari compiti in continuo aumento di complessità.

Come abbiamo già descritto più ampiamente nel cap. 6 *Consapevolezza,* l'evoluzione biologica tende a produrre *riflessi*, rapidi ed efficaci. Nelle specie di piccole dimensioni (insetti) questi sono stati raggiunti ed ottimizzati geneticamente con reti neuronali minimali con connessioni cablate fin dalla nascita, a scapito dell'adattabilità fenotipica individuale al variare delle condizioni ambientali. La specie però geneticamente può adattarsi se la velocità di riproduzione dei suoi individui è ben superiore alla velocità dei cambiamenti ambientali, ma se ci soffermiamo a valutare il successo delle specie in termini di diffusione, durata nel tempo, biomassa, e numero d'individui, ci accorgiamo che il mondo è dei batteri, delle piante e funghi che non hanno sistema nervoso.

Le specie che mostrano viceversa adattabilità fenotipica hanno sviluppato corpi grandi e sistemi nervosi in grado di sviluppare nuovi comportamenti nel corso della loro vita (riflessi condizionati) apprendendo singolarmente **nuovi nessi causali**. Per questo necessariamente hanno sviluppato reti neuronali con connessioni plastiche (modificabili) in grado di codificare (memorizzare) esperienze personali che vengono utilizzate per formare appunto nuovi riflessi. Nelle specie ancora più evolute, i cui individui modificano gli ambienti (nidi, tane, città), le reti corticali si sono espanse notevolmente per codificare esperienze personali sempre più articolate, ed infine sono comparse reti neuronali (prefrontali) in grado di codificare volontariamente esperienze immaginate sulla base di quelle realmente esperite. La presenza di queste strutture fornisce la capacità di prevedere, che in altri termini significa immaginare il proprio futuro sensoriale in funzione di esperienze fatte in passato o di percezioni contingenti (Fig. 35).

Fig. 35. Comparsa ed evoluzione del sistema nervoso.

Si è detto che l'evoluzione del sistema nervoso tende ad individuare nessi causali nell'interazione ambientale e a confezionare riflessi, perché rapidi ed efficaci. Quando questo non è possibile per la frequente novità e imprevedibilità delle interazioni che la specie incontra, come nei primati, l'evoluzione produce strutture neuronali in grado di produrre immaginazione o pensiero. Con la ripetizione frequente di un certo comportamento *pensato* questo può diventare in buona parte *riflesso* (es. guida di veicoli). In sintesi, possiamo dire che la *mente supplisce ai riflessi mancanti*.

La coscienza, la consapevolezza degli effetti delle proprie azioni sull'ambiente e su di sé, è un correlato operativo del funzionamento delle reti neuronali prefrontali che distinguono ciò che è immaginato da ciò che è percepito per poter affrontare nuove situazioni. Se queste si presentano ripetutamente il comportamento ripetuto diventa automatico come un riflesso, non è più necessaria l'immaginazione delle conseguenze, che diventano note implicitamente e la consapevolezza svanisce.

Perché una mente?... Per costruire riflessi!

19. LIVELLI FUNZIONALI GERARCHICI

Dalle osservazioni di anatomia comparata del sistema nervoso nelle varie specie si nota un progressivo sviluppo disomogeneo (non uguale nelle sue parti) che assume un andamento esponenziale tanto più le strutture neuronali encefaliche sono recenti (cortecce) fig. 36 animata. Questo andamento sembra correlare con il pari sviluppo esponenziale del comportamento interattivo con l'ambiente, dal riflesso al pensiero.

Abbiamo detto che la spinta evolutiva principale, probabilmente, è l'utilità di individuare nessi causali negli eventi ambientali percepiti e quindi ci siamo proposti di studiare come le varie funzioni delle reti neuronali si sviluppano progressivamente e si strutturano gerarchicamente. Quanto di seguito descritto è un'ipotesi consistente a nostro parere, non ancora dimostrata scientificamente, ma che almeno ha l'intenzione di spiegare l'evoluzione del comportamento cognitivo consapevole in chiave evoluzionistica.

In animali molto antichi, i cordati precursori dei vertebrati 500 milioni di anni fa, nei quali si è assestata una simmetria corporea bilaterale e un'asimmetria rostro-caudale e ventro-dorsale (a farla breve, animali che hanno una testa, una coda, una pancia e un dorso), si osserva che il sistema nervoso nel cranio è già costituito da tre gruppi di strutture funzionalmente distinte che ritroviamo progressivamente più espanse e definite in tutti i mammiferi attuali noi compresi: una stazione multisensoriale (talamo), strutture per il controllo motorio (nuclei basali e cervelletto) e strutture per la memorizzazione fenotipica individuale (pallium o corteccia). L'evoluzione ha progressivamente ottimizzato questi componenti espandendone indipendentemente dimensioni e connessioni tanto da far emergere funzioni comportamentali sempre più sofisticate (Fig. 36).

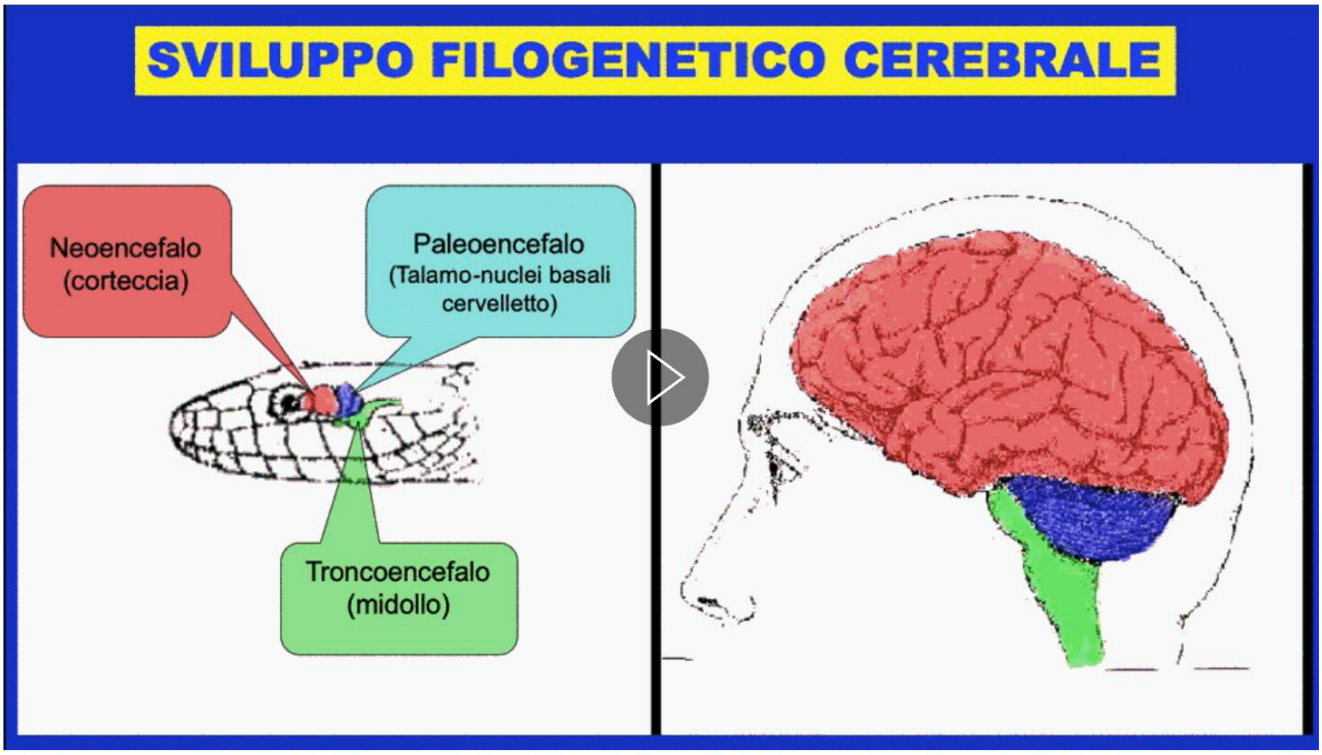


Fig. 36 (animata). Sviluppo filogenetico cerebrale. Le tre porzioni del sistema nervoso encefalico evidenziate in colori mostrano uno sviluppo dimensionale e di conseguenza funzionale differente nelle specie in progressiva evoluzione. La corteccia (in rosso) diventa predominante nei mammiferi superiori.

In questo processo sembra comunque di cogliere un'organizzazione gerarchica in livelli sovrapposti: le strutture neurologiche più antiche (midollari) utilizzano le informazioni sensoriali come ingresso e gli effettori come uscita, mentre le strutture neurologiche più recenti utilizzano quelle più antiche come ingresso e uscita. Potremmo dirla anche in altro modo: le reti neuronali antiche, più semplici, percepiscono l'ambiente esterno con sensori e reagiscono (riflessi) su questo con effettori; le reti più recenti, encefaliche sovrapposte alle precedenti, percepiscono l'attivazione delle reti sottostanti e agiscono su queste, non direttamente sull'ambiente. Inoltre ogni livello manifesta una notevole ricorrenza interna tra i neuroni che lo compongono, per cui l'attivazione in uscita di ogni rete si riverbera sui propri ingressi e aumenta quantitativamente con il progredire dei livelli (più si sale di livello più le reti percepiscono retroattivamente il proprio stato di attivazione) (Fig.37). Si può immaginare solo lontanamente quale trasformazione dell'informazione sensoriale abbia luogo all'interno di tutto il sistema.

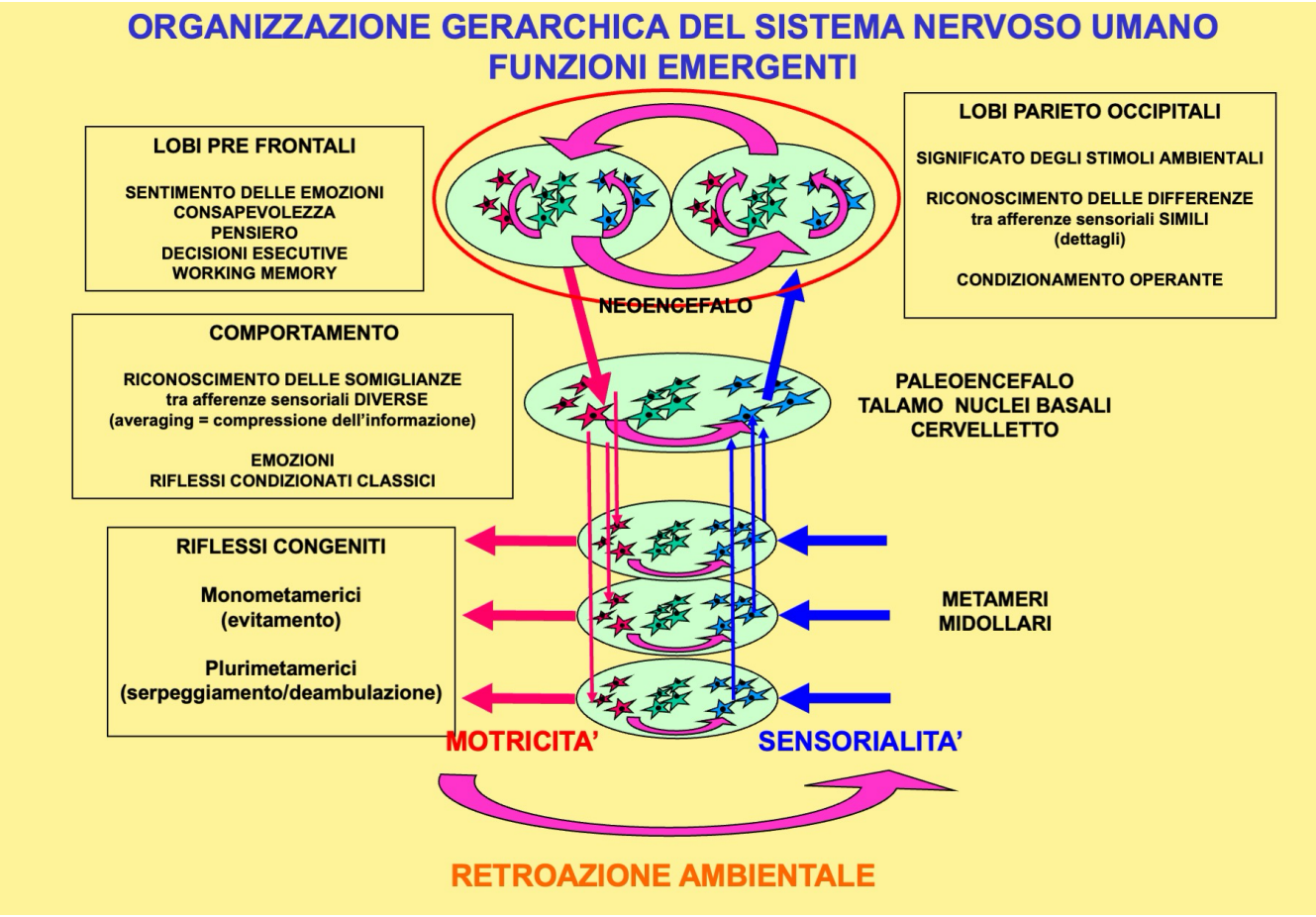


Fig. 37. Organizzazione schematica del sistema nervoso umano: le frecce blu rappresentano le attivazioni sensoriali e le loro vie, quelle rosse le vie motorie, frecce viola rappresentano le retroazioni ai vari livelli delle strutture del sistema nervoso e nell'ambiente e le loro dimensioni ne rappresentano il peso. A livello corticale probabilmente le retroazioni costituiscono la maggior parte del funzionamento delle reti qui allocate (la corteccia vede prevalentemente sé stessa).

In reti neuronali così complesse possiamo tentare di schematizzare le competenze funzionali proponendo un modello molto riduttivo con quattro principali livelli gerarchici, in analogia alla teoria dei tre cervelli sovrapposti di Mc Luan, attualmente forse un poco superata nella sua forma più semplice, ma sempre illuminante (Fig. 38).

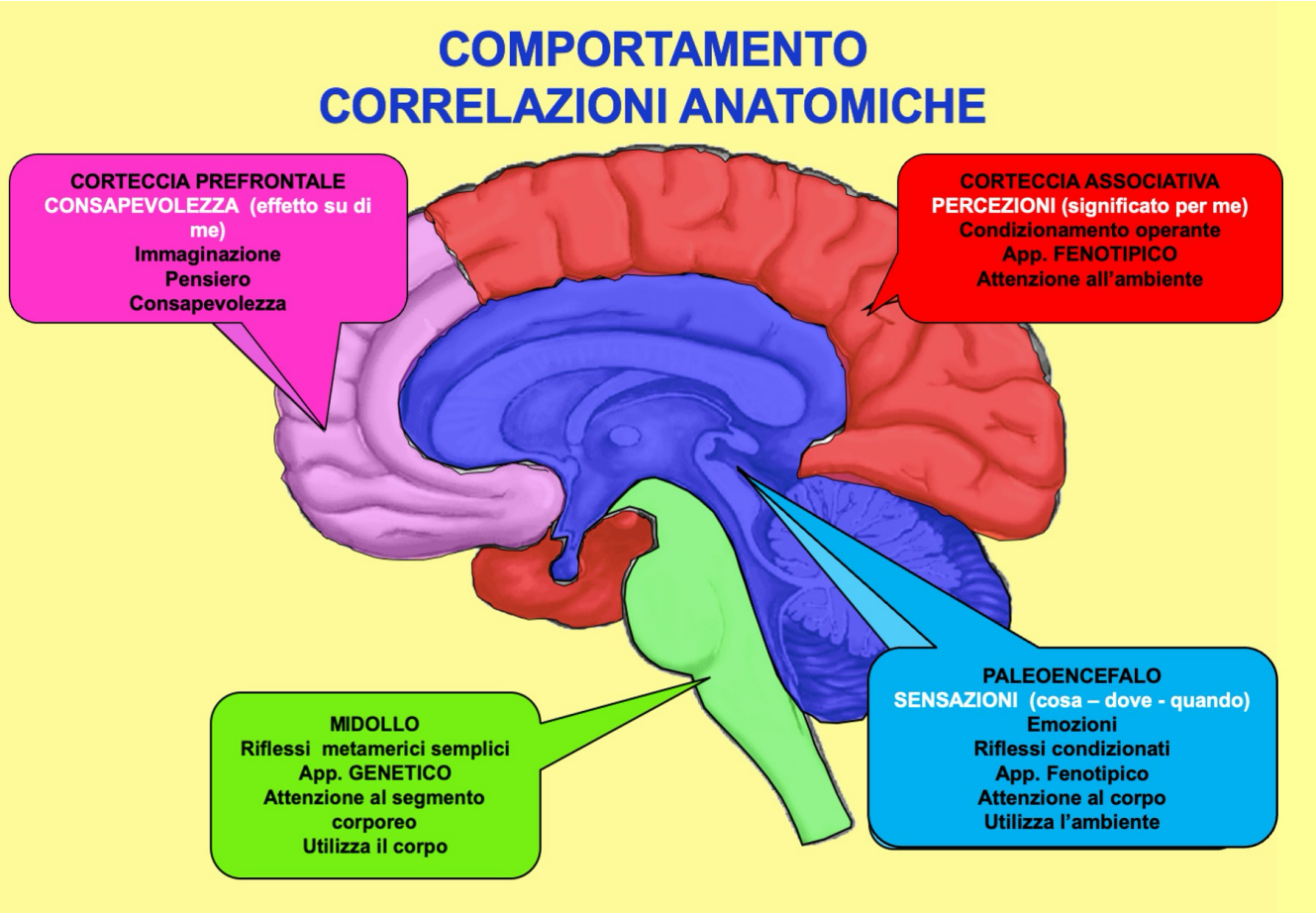


Fig. 38. Correlazioni anatomiche con il comportamento nell'ambiente. Le funzioni emergono nel comportamento con le sue retroazioni sensoriali, non sono nel cervello!

Proviamo ad interpretare il funzionamento del sistema nervoso seguendo i processi evolutivi del comportamento che tendono a produrre organismi in grado di fronteggiare sempre meglio la variabilità ambientale. Si può cogliere un progressivo aumento di articolazione e finalizzazione della risposta motoria, che dal semplice riflesso segmentale di retrazione di un arto ad uno stimolo doloroso (riflesso nocicettivo) raggiunge il comportamento intenzionale o volontario di mantenere, ad esempio, quell'arto esposto allo stimolo doloroso (prelievo di sangue o… Muzio Scevola). Questo aumento di complessità comportamentale è correlato alla stratificazione e organizzazione gerarchica di strutture neurologiche che dal midollo terminano nella corteccia cerebrale ed in quella prefrontale, evolutivamente ultima arrivata.

Nella seguente descrizione dell'organizzazione del sistema nervoso utilizzeremo la parola *attenzione* (generalmente legata al concetto di coscienza) anche in senso lato per indicare un filtraggio, un processo selettivo automatico, di alcune configurazioni neuronali rispetto ad altre che consiste nella formazione **di rappresentazioni neuronali degli eventi più rilevanti** nel contesto sensoriale. Quando questa funzione, già presente a livello periferico (cute e retina, per le quali abbiamo già illustrato i

meccanismi d'inibizione laterale), viene implementata nelle strutture corticali associative, ed infine a livello corticale prefrontale, emergono funzioni cognitive intenzionali molto sofisticate.

Quattro livelli gerarchici

1° livello: il midollo

Il midollo spinale, con la sua espansione endocranica il troncoencefalo, è costituito da una serie di stazioni simili (metameri) sovrapposte e collegate. Nel suo insieme è delegato ad attuare automaticamente riflessi rapidi e locali erogati a seguito di uno stimolo locale, senza o con scarsa necessità di retroazione sensoriale per pilotare l'esecuzione (es. la rapida retrazione di un arto in conseguenza di uno stimolo dolorifico o la contrattura della muscolatura di un lato della colonna vertebrale). A questo livello si generano anche sequenze di attivazione multi-metameriche, opportunamente temporizzate, che consentono la progressione del corpo con movimenti stereotipati di serpeggiamento o di andatura su due o più arti. Queste funzioni sono visibili in molti animali, anche mammiferi se *opportunamente!* sacrificati separando l'encefalo dal midollo. Con questa separazione i neuroni midollari sensoriali non possono ricevere informazioni dal mondo esterno tramite vista, udito, olfatto, ma solo dai loro segmenti corporei attraverso i sensori cutanei (caldo, freddo, pressione diffusa o puntiforme) e dai recettori muscolari e tendinei (posizione dell'arto, forza utilizzata e reazione vincolare dell'ambiente). Sul versante sensoriale si osservano circuiti neuronici locali d'inibizione laterale, che tendono ad aumentare il contrasto spaziale e temporale degli stimoli, come già detto un meccanismo automatico di esaltazione degli stimoli più rilevanti. Sul versante motorio i neuroni midollari attivati da quelli sensoriali effettuano risposte riflesse semplici, veloci e contingenti.

Sintetizzando, il midollo percepisce alcuni effetti dell'ambiente sui segmenti corporei e reagisce con azioni locali di questi, geneticamente consolidate: sostanzialmente riflessi di evitamento, allontanare la parte del corpo stimolata o tutto il corpo con serpeggiamenti o deambulazione. Ma non è in grado di respingere lo stimolo, per questo è necessario attendere lo sviluppo di strutture nel paleoencefalo e corteccia.

Il midollo gestisce localmente l'interfaccia corpo-ambiente e reagisce con riflessi segmentali: *attenzione allo stimolo contestuale locale metamerico* (del tutto non cosciente).

2° livello: il paleoencefalo
(mesencefalo, talamo, nuclei sottotalamici, amigdala, nuclei basali, cervelletto, archi- e paleopallio)

È una sorta di cervello primitivo, peraltro già molto efficiente (pesci, anfibi), situato al centro dell'encefalo, al di sotto della corteccia cerebrale evolutivamente più recente (neopallio). Il paleoencefalo nelle sue strutture sensoriali raccoglie e integra tutte le informazioni che provengono dal midollo e da organi recettoriali complessi (naso, occhi, orecchie, apparato vestibolare) che hanno sede nel capo. A questo livello è possibile una percezione non cosciente anche di fenomeni esterni lontani dal corpo. La vista di un pericolo o di una preda, o di un possibile partner sessuale può qui generare sequenze di riflessi vegetativi e somatici che costituiscono le emozioni fondamentali (v. cap. 23 *Emozioni*). A questo livello inoltre è possibile una memorizzazione di esperienze più o meno ripetute, un apprendimento individuale (fenotipico). Questo significa che alcune di queste strutture neurologiche possono modificare le connessioni tra i loro neuroni nel corso della vita dell'individuo. È una memoria esecutrice, un *saper fare*, del tutto automatica. La presenza di questa memoria può dare l'impressione, in noi che osserviamo, che animali con solo questo livello funzionale prevedano alcuni eventi ambientali per l'efficacia delle loro azioni (es. rana che cattura una mosca in volo), ma in realtà esprimono solo sequenze comportamentali, attivate da nessi causali memorizzati, che si sono dimostrate utili nel loro passato o in quello della loro specie e che è probabile siano utili anche in situazioni presenti percepite sensorialmente come simili a quelle apprese. Queste sequenze motorie sono ancora molto stereotipate ed in buona parte preprogrammate (erogate senza necessità di feedback sensoriale nel corso del movimento), ma comunque sostenute dalla retroazione sensoriale conseguente l'azione (tripletta associativa) se il risultato dell'azione è stato positivo per l'individuo (la rana ha catturato la mosca).

Sintetizzando, il paleoencefalo gestisce alcuni eventi o fatti dell'ambiente percepiti attraverso l'attivazione congiunta di molte strutture sensoriali (sensorialità multimodale), e può apprendere nessi causali tra essi (riflessi condizionati classici) per produrre comportamenti utili agendo sulle stazioni motorie midollari. A questo livello i meccanismi automatici di esaltazione del contrasto filtrano l'insieme sensoriale che merita una risposta rapida, una sorta di *attenzione ancora non cosciente* agli elementi del contesto ambientale più importanti per l'individuo. L'integrazione e filtrazione sensoriale costruiscono una scena ambientale (*scena paleoencefalica*), una rappresentazione del contesto, non cosciente, ma sufficiente ad estrarre dalla moltitudine di afferenze sensoriali gli elementi più salienti per generare un comportamento utile (fuga, attacco, accoppiamento).

L'ambiente che il paleoencefalo *vede* e sul quale opera è il midollo, compresa la porzione intracranica (troncoencefalo).

Il paleoencefalo gestisce automaticamente il sottostante midollo portando *attenzione al contesto sensoriale globale,* utilizzando riflessi genetici e fenotipici (emozioni), scena paleoencefalica.

3° livello: le cortecce sensoriali, associative-mnesiche e motorie

Questo livello, che corrisponde al neopallio o neocortex, può essere considerato un serbatoio di memorie fenotipiche a cui, con la sua espansione nel corso dell'evoluzione, si sono aggiunte anche funzioni più sofisticate. Già in mammiferi inferiori come i topi le cortecce sensoriali, associative e motorie sono chiaramente presenti, e nei primati sono praticamente identiche a quelle umane (non così la corteccia prefrontale, molto sviluppata solo nella specie Homo).

Perché l'evoluzione ha prodotto cortecce sensoriali e motorie, considerato che già esistevano, come abbiamo detto, efficientissime strutture sensori-motorie paleoencefaliche? L'abilità di un coniglio (corticalmente poco dotato) nell'evitare i pericoli o scovare nutrienti è già notevolissima. Cos'è comparso di particolare nei mammiferi superiori, legato al grande sviluppo delle cortecce sensoriali e motorie? Il progressivo sviluppo dell'utilizzo delle esperienze individuali (il riconoscimento dei nessi causali tra gli eventi) per ottimizzare il comportamento, catturare prede difficili, modificare l'ambiente (nidi, tane..) e infine per la manipolazione su di questo, già timidamente presente nei roditori.

Naturalmente manipolazione e cortecce motorie sono evolute insieme. La manipolazione dell'ambiente è stata un fatto cruciale per il miglioramento della sopravvivenza. Questo ha necessariamente anche richiesto un miglioramento della conoscenza dell'ambiente. Cosa codificano allora di diverso i neuroni associativo-sensoriali neocorticali rispetto ai loro equivalenti delle strutture paleoencefaliche, più primitive?

Anche se non abbiamo trovato riscontri chiari in letteratura, pensiamo che la risposta più probabile sia: la *classificazione o categorizzazione* delle caratteristiche significative dell'ambiente, e come abbiamo detto il riconoscimento dei nessi causali tra gli eventi percepiti, ovvero attenzione ai *significati personali* dei fatti ambientali. Il midollo ritrae l'arto se scottato; il paleoencefalo produce automaticamente una fuga se individua il fuoco che si avvicina; la corteccia sensoriale riceve rappresentazioni di questo dal paleoencefalo e lo classifica come tale, lo *riconosce*, ne valuta posizione ed estensione e movimento (come velocità del cambiamento sensoriale), e si allontana o meno o lo utilizza con azioni adeguate al contesto. In questo esempio si nota la capacità di reagire ad un fatto ambientale riconosciuto anche nelle caratteristiche funzionali sempre più distante dal proprio corpo, con chiaro vantaggio sulla propria sopravvivenza. E queste complesse operazioni (percezione) possono comunque essere effettuate ancora senza consapevolezza.

Nelle aree sensoriali e mnesiche corticali la *scena ambientale* rappresentata è molto ricca di particolari (*scena corticale*), ma in un certo qual modo è una scena molto più costruita personalmente di quella generata a livello paleoencefalico. Le afferenze sensoriali contingenti filtrate e integrate dalle strutture paleoencefaliche, *scena paleoencefalica*, ha prevalentemente la funzione d'innesco su memorie

associative corticali, le quali costruiscono la *scena corticale* e la rappresentano con categorie apprese e memorizzate individualmente attraverso esperienza e cultura.

Ripetiamo: pensiamo che le cortecce associative sensoriali *non rappresentino l'ambiente, ma* **l'interazione del corpo con l'ambiente** (*significati personali*) *di questo*. Non pura sensorialità, ma categorizzazione della sensorialità; categorizzazione che negli umani comprende anche la nomenclatura, cioè l'etichettatura linguistica degli oggetti e dei fatti. Sinteticamente: si categorizza solo quello che già si conosce (ciò che è stato memorizzato), esplicitamente o implicitamente. Percepisco "una sedia" e non un ammasso di legna perché lo riconosco come appartenente alla categoria *sedia* che ho più volte utilizzato nella mia esperienza. Trovare significati o classificare stimoli vuol dire collegare la percezione attuale con la memoria di eventi simili già esperiti e percepire un evento vuol dire aver riconosciuto il nesso causale che lo ha prodotto. Tutto questo è molto utile per attuare automaticamente nuove scelte comportamentali, insomma per agire in base all'esperienza.

Siamo talmente abituati ad assegnare automaticamente un significato a tutto ciò che percepiamo che ci sembra ovvio che qualunque animale, anche una cavalletta, debba percepire il mondo similmente a noi; ma la situazione è ben diversa. Anche tra conspecifici, tra noi umani, la classificazione di uno stesso oggetto può includere caratteristiche molto diverse a seconda delle precedenti esperienze. Ad es. la vista di un cane può evocare simpatia e fedeltà in alcuni, paura e fuga in altri, o possibilità di cibo in altri ancora.

Per trovare un significato è necessario collegare le modalità sensoriali alla memoria, per isolare dallo sfondo quei fenomeni ed oggetti che ci sembrano degni di attenzione. La costruzione della *scena corticale* è un'operazione automatica molto complessa, possibile solo in funzione delle conoscenze già acquisite. Si deve individuare una discontinuità tra l'oggetto e lo sfondo, un sasso viene distinto dal terreno circostante, e gli vengono attribuite caratteristiche che derivano dalla passata esperienza (memoria) come la maneggiabilità, il peso stimato, l'asperità della sua superficie, il possibile utilizzo e la reale forma tridimensionale ricavata da una immagine bidimensionale. Provate a guardare con un solo occhio una moneta su di un tavolo ad un metro da voi Fig. 39.

Vedete un oggetto ellissoidale bidimensionale (sensazione), ma lo riconoscete (percepite) come una moneta tridimensionale rotonda che potete anche ruotare mentalmente immaginandola. L'immagine bidimensionale ellissoidale vista, con le altre sue caratteristiche, costituisce solo l'innesco per la classificazione *moneta* rappresentata corticalmente con la sua tridimensionalità, spessore, peso e valore. Come abbiamo già detto, le reti neuronali corticali *percettive* associano le sensorialità contestuali a rappresentazioni memorizzate, ossia rievocano ricordi di esperienze simili anche se non identiche a quella attuale. La *contestualizzazione percettiva visiva* è davvero un processo neuronale sbalorditivo: osservando un'immagine televisiva bidimensionale, statica o in movimento, con angolo di visione non modificabile dall'osservatore, confinata in uno spazio ridotto, inserita in un contesto locale assai diverso dal contenuto dell'immagine, si può valutare correttamente il suo significato come proveniente da una sensorialità visiva lontana nel tempo e nello spazio. Potete immaginare la complessità del processo che le reti neuronali corticali devono compiere? E se pensate che il sistema si

è evoluto quando nessun televisore era sul pianeta, capite che è un processo percettivo incredibilmente adattivo e rapidissimo nell'apprendimento fenotipico individuale.

"Vista Artificiale" ci vorrà parecchio tempo prima di avvicinarsi alla "Vista Biologica".

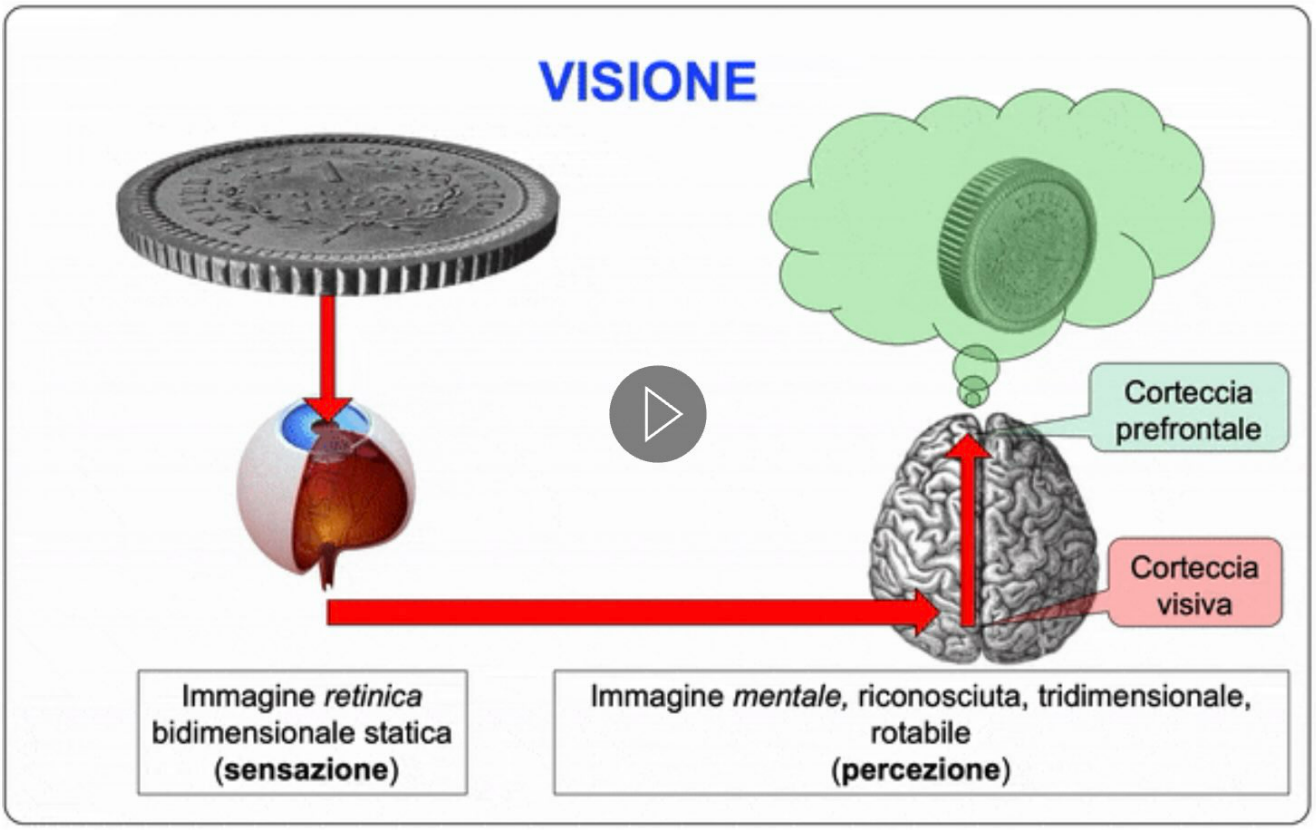


Fig. 39. (animata) Immagine ellissoidale di una moneta rotonda.

Inoltre una volta effettuata l'identificazione di un oggetto compare automaticamente una funzione, detta *costanza percettiva*, che consiste nella capacità di riconoscere l'oggetto indipendentemente dalla distanza ed angolazione da cui è visto e dal suo movimento. Questo implica che la corteccia visiva deve estrarre dalla mutevole afferenza retinica quegli elementi costanti che consentono la classificazione dell'oggetto. Quando poi la variazione dell'immagine retinica dipende anche dal movimento del proprio corpo, e in particolare da quello degli occhi, per il mantenimento della costanza percettiva deve essere utilizzata quella che è definita *copia efferente* del movimento oculare, un'attivazione neuronale che porta informazione di questo movimento anche alle aree sensoriali per annullare (compensare) lo spostamento retinico dell'immagine dovuto al movimento degli occhi e/o della testa. E questo non accade se lo spostamento retinico dell'immagine è dovuto invece ad un movimento di oggetti nell'ambiente, notevole vero? Questo spiega la stabilità della visione anche se è sempre presente un

incessante e veloce movimento esplorativo oculare (saccadi) in aggiunta ai movimenti del capo e del corpo.

Forse per avere un'idea di cosa significa agire senza estrarre significato cosciente si può riflettere sulla quantità di operazioni anche complesse che effettuiamo in continuazione, come aprire un armadio per vestirsi, per non parlare della guida di veicoli nel traffico, che vengono effettuate con una implicita immaginazione del risultato della sequenza di azioni che vengono compiute.

Da più di cinquant'anni è noto che nelle aree corticali visive non è codificata l'attivazione sensoriale delle retine, ma caratteristiche sensoriali dell'ambiente come il colore, la forma, il movimento e la tridimensionalità degli oggetti. Perché mai allora si continua a pensare che la corteccia sensoriale somatica (S1) codifichi solo sensazioni tattili corporee, e non piuttosto caratteristiche interattive tattili dell'ambiente, anche qui tridimensionali? Perché si sono coniati i termini più o meno oscuri di *sensibilità protopatiche* per quelle talamiche e *sensibilità epicritiche* per quelle corticali? Non è forse meglio parlare di *sensibilità somatiche*, relative al corpo, per quelle talamiche, e *caratteristiche tattili dell'ambiente* per quelle corticali? In altri termini, se tocco una superficie troppo calda, le prime codificheranno "pericolo per la mia mano", e le seconde "questo oggetto è molto caldo", o, in altre circostanze, "questa cosa che tocco nella mia tasca è una chiave", con tutte le sue caratteristiche tridimensionali che me la possono addirittura far riconoscere come "la chiave di casa mia" senza vederla.

La supposta *organizzazione somatotopica* dell'area S1 afferma che questa corteccia codificherebbe la sensibilità tattile in una mappa antropomorfa (*omuncolo*). Ma il fatto che la struttura di una superficie (forma e ruvidezza) sia esplorabile molto bene anche con una estensione meccanica della mano, ad es. un'asticella di legno, dovrebbe far dubitare dell'esistenza di una tale mappa corticale somatica. Ovviamente l'ipotetica mappa non includerebbe l'asticella con il suo peso e dimensione; eppure, già dalla prima volta che l'asticella striscia delicatamente sull'oggetto, le vibrazioni trasmesse ai sensori cutanei della mano consentono il riconoscimento (la classificazione) della forma dell'oggetto e della tessitura della sua superficie, come se la sensibilità tattile venisse trasferita dal dito alla punta dell'asticella. Provate a scorrere un oggetto con un'asticella ad occhi chiusi e vi accorgerete di questo trasferimento *magico*.

Generalizzando, le cortecce S1 contengono la rappresentazione dell'interazione tattile del corpo, in particolare le mani, con gli oggetti (forma, peso, consistenza, temperatura), e non solo quale parte del corpo o della mano ne viene in contatto. Una porzione particolare delle cortecce posteriori, presente nella zona mediale e detta appunto Corteccia Postero-Mediale (CPM), sembra dedicata ad integrare tutte le esperienze multisensoriali per ottimizzare la classificazione degli oggetti ed eventi.

Questo diverso approccio ha notevoli conseguenze per lo studio delle funzioni corticali perché, se quanto detto è vero, la ricerca affannosa di mappe somatotopiche corticali rappresentanti in modo più o meno deformato la provenienza corporea degli stimoli sensoriali (S1) o la destinazione muscolo-scheletrica dei comandi motori (M1), diventa priva di senso. Perché mai dovrebbero esistere mappe somatiche? Quegli omuncoli mostruosi disegnati sulle cortecce somatiche e motorie, che allignano in tutti i testi di neurologia e che tra l'altro non rispettano la continuità anatomica dei segmenti corporei?

Queste mappe furono proposte e sviluppate inizialmente dal neurochirurgo canadese Wilder Penfied nella prima metà del secolo scorso utilizzando una metodica che, alla luce delle attuali conoscenze, sembra impossibile possa aver avuto credito. Una stimolazione elettrica corticale prodotta da un piccolo elettrodo sulla corteccia sensoriale S1, a cranio aperto con solo anestesia locale durante interventi neurochirurgici per altri scopi, provocava sensazioni tattili localizzate su segmenti cutanei degli arti e del corpo in funzione del punto corticale stimolato, e parimenti provocava piccoli movimenti di segmenti del corpo, ugualmente localizzati, quando venivano stimolati punti dell'area motoria M1. Questo indusse Penfield a disegnare mappe somatiche sensoriali e motorie sulle cortecce stimolate e affermare che dette mappe fossero rappresentazioni antropomorfiche della distribuzione della sensibilità somatica e della motilità volontaria.

Quello che ci appare incomprensibile è che questa fantasiosa ipotesi sia tuttora considerata valida e venga proposta, senza nessuna spiegazione consistente, come realtà neurofisiologica. Lo stimolo elettrico, più o meno localizzato, non può minimamente produrre una stimolazione strutturata nei milioni di neuroni, opportunamente collocati e connessi secondo la citotettonica dei sei strati sottostanti, che simuli anche lontanamente la configurazione fisiologica di attivazioni e inibizioni che si forma a seguito di un evento sensoriale o in procinto di un movimento segmentale. La metodica di Penfield è poco diversa dal dare una martellata sulla corteccia e pretendere che le conseguenze forniscano indicazioni sul funzionamento di questa.

Tolleranza per Penfield, dato il suo tempo, ma non per chi continua a proporre questo modello, perché non solo è privo di senso, ma è totalmente fuorviante, e appare tuttavia come un dogma nelle enciclopedie e nei testi di neurologia.

La stimolazione elettrica alla Penfield sulla corteccia visiva V1 provoca solo fosfeni (fugaci macchie luminose), percepiti in zone diverse del campo visivo (ambiente) in relazione al punto stimolato sulla corteccia; mai immagini strutturate, ovviamente, come abbiamo detto, per la grossolanità della stimolazione. Parimenti la stimolazione dell'area S1 provoca solo sensazioni tattili elementari, analoghe ai fosfeni visivi, in diverse zone cutanee in relazione al punto corticale stimolato; anche qui mai sensazioni tattili strutturate quali la forma, la consistenza e la rugosità di un oggetto.

Queste osservazioni avrebbero dovuto far capire che questa modalità d'indagine, meno invasiva recentemente usando tecniche di stimolazione transcranica TMS,TDCS, non era certo idonea a definire il funzionamento delle reti corticali, e tra l'altro avrebbe dovuto togliere ogni illusione di ripristinare la visione, persa per patologie oculari, stimolando la corteccia visiva con multielettrodi collegati a telecamere, come ancora qualcuno tenta di fare; tra l'altro saltando con noncuranza l'attivazione delle strutture visive retiniche e paleoencefaliche (corpi genicolati e collicoli) intermedie che trasmettono alla corteccia visiva rappresentazioni già molto elaborate delle immagini retiniche. Pare impossibile che qualcuno apparentemente esperto di neurofisiologia della visione consideri ancora l'occhio come una telecamera e la corteccia occipitale come uno schermo televisivo. Se per qualche imperscrutabile motivo fosse stato utile e vantaggioso per gli animali evoluti rappresentare topograficamente la superficie retinica sulla corteccia visiva, sicuramente l'evoluzione avrebbe trovato modo di connettere direttamente i fotorecettori con i neuroni corticali accorciandone il più possibile la distanza, magari

trasferendo addirittura parte della corteccia visiva *dentro* i bulbi oculari. L'anatomia ci dice invece che le cose sono assai diverse, e ogni stazione sinaptica lungo le vie sensoriali svolge un rimaneggiamento dell'informazione orientato alla risposta motoria e alla classificazione cognitiva che avviene nelle cortecce.

Nella retina, due strati neuronali verticali (cellule bipolari e gangliari) connesse con due strati orizzontali (cellule amacrine e orizzontali) attuano un'esaltazione del contrasto spaziale e temporale e una compressione dell'informazione tale che 150 milioni di fotorecettori convergono su un milione di fibre del nervo ottico. Negli animali con occhi frontali e visione binoculare come l'Uomo le fibre del nervo ottico effettuano poi un parziale incrociamento nel cosiddetto *chiasma ottico* e raggiungono i *corpi genicolati laterali* (una parte del talamo). Infine le fibre che partono da questi nuclei raggiungono le due cortecce V1 convergendo in modo che in ogni emisfero cerebrale le informazioni sull'ambiente riguardino la metà controlaterale del *campo binoculare, che può non coincidere con l'asse del corpo* considerando la possibilità di rotazione dello sguardo. L'area V1, quella della proposta mappa retinotopica, è per l'80% dedicata al campo visivo foveale, che è ampio circa 2 gradi (l'angolo di 1 minuto tra le lancette dell'orologio è di 6 gradi) rispetto ai 100 e più gradi del campo visivo totale di ogni occhio. I campi visivi dei due occhi si sovrappongono solo per una sessantina di gradi di visione binoculare, con solo i 2 gradi foveali coincidenti effettivamente tra i due occhi, mentre il resto è disallineato orizzontalmente e fornisce informazioni sulla tridimensionalità dell'ambiente. Solo la zona foveale fornisce informazioni cromatiche in alta risoluzione; il preponderante resto della retina fornisce grossolane informazioni spaziali di gradienti di luminosità con particolare sensibilità invece ai cambiamenti temporali di illuminazione locale (movimenti). E non basta: le immagini sulla retina sono in continuo movimento per cambiamenti nell'ambiente, cambiamenti di posizione del corpo, e per la continua esplorazione rapida (saccadi) e lenta (inseguimento) da parte dei bulbi oculari (sguardo). Lo strabiliante risultato di questo incessante lavoro oculare e corticale è *la percezione stabile e ampia di una scena ambientale dettagliata in risoluzione, cromaticità, tridimensionalità e movimento*… e qualcuno vuole ancora parlare di mappe retinotopiche corticali?

È stata solo la visione connessionista (v. più avanti) a portare un po' di luce in questo campo: è la plastica funzione della rete *nella sua totalità* che compie insondabilmente il lavoro di classificazione, riconoscimento e generalizzazione della sensorialità. Ogni neurone partecipa con livelli di attività variabili in tutte le diverse occasioni, perché interconnesso con una moltitudine di altri neuroni parimenti coinvolti. **L'attività di ogni neurone corticale dipende tanto dall'attivazione sensoriale proveniente dall'ambiente interno ed esterno quanto, e forse più, dall'attività di tutti gli altri neuroni coinvolti, che cambia continuamente anche di fronte ad una identica stimolazione sensoriale, perché influenzata dalla incessante attività globale del sistema nervoso.** Tutti i neuroni corticali sono costantemente in attività, anche indipendentemente dalle attivazioni sensoriali ambientali, perché, come abbiamo detto, a questo livello sono preponderanti le connessioni retroattive corticali che mantengono la rete in attività. Ripetiamo, questo dovrebbe bastare a vanificare qualunque tentativo di comprendere il funzionamento di specifiche aree studiando l'attività di singoli neuroni, anche nell'ipotetica possibilità di visualizzare tutti i loro singoli stati di attivazione continuamente variabili in tutta la rete.

La presenza dei solchi cerebrali, come è noto, esiste per aumentare notevolmente la superficie della corteccia senza aumentare volumetricamente la dimensione del capo che complicherebbe il parto e il movimento nell'adulto, non certo per delimitare aree corticali con funzioni diverse. Il solco centrale di Rolando quindi si è formato proprio per aumentare l'estensione delle reti neuronali di connessione tra l'area somatica sensoriale S1 e quella motoria M1. Forse varrebbe la pena di riconsiderare la ipotetica separazione funzionale delle due aree e considerarle invece un'unica area sensori-motoria, dacché un qualsiasi movimento finalizzato non può essere eseguito senza la valutazione propriocettiva della posizione di partenza degli arti, e, nei gesti non ballistici, anche della traiettoria in esecuzione.

Nell'evoluzione dei riflessi si può considerare che i primi a comparire siano stati i riflessi midollari *monomodali di solo evitamento* dove, se lo stimolo è lieve, la connessione tra sensori tattili, termici e propriocettivi e gli effettori muscolari coinvolge solo poche sinapsi nel metamero interessato, con risposte segmentali e transitorie (retrazione locale). Se invece lo stimolo è intenso possono venire coinvolti più metameri e le risposte sono generalizzate e prolungate, con movimenti multisegmentali ripetitivi (serpeggiamento/locomozione).

Quando compare il paleoencefalo, che integra le informazioni che provengono da tutte le strutture sensoriali (endo ed exocettori, Fig. 40), i riflessi motori/secretivi possono essere *bimodali: di evitamento o di avvicinamento,* ed anche molto articolati e finalizzati come nelle emozioni.

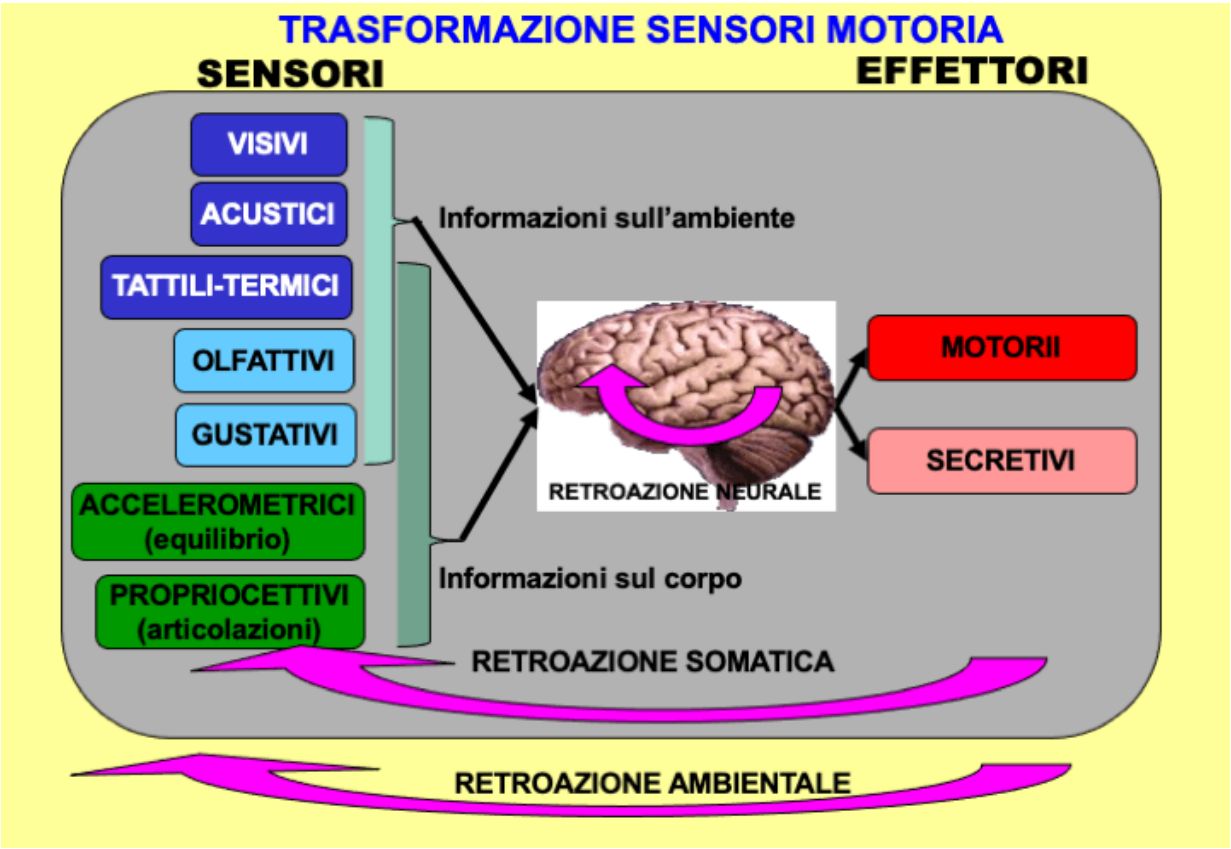


Fig. 40. Trasformazione Sensori-Motoria: il sistema nervoso trasforma le rappresentazioni sensoriali provenienti dall'ambiente e dal corpo in rappresentazioni motorie e secretive. Le frecce viola evidenziano la presenza delle retroazioni ai vari livelli, neuronale, somatica e ambientale.

Per generare efficacemente questi riflessi è necessario un riconoscimento implicito della scena ambientale contestuale. Questo è possibile integrando le informazioni *contestuali endogene* (stato del corpo e informazioni posturali statiche e dinamiche) con le informazioni *esogene* (dell'ambiente) e con memorie genetiche e fenotipiche di esperienze simili. A questo livello sono rilevanti le informazioni dell'olfatto e del gusto, che possono essere considerati exocettori di prossimità, le cui strutture neuronali a livello paleoencefalico sono già del tutto sviluppate.

Successivamente, il grande sviluppo delle cortecce sensoriali visive, acustiche e tattili consente di *modulare con precisione* i riflessi paleoencefalici e di produrre comportamenti *personalizzati*. Qui devono essere integrate le informazioni di *localizzazione spaziale accurata* di oggetti o fatti nell'ambiente con le loro *caratteristiche qualitative* (forma, colore, movimento, temperatura, consistenza, sonorità ecc.) unitamente a memorie fenotipiche di sensorialità esperite nel corso della vita, che consentono un personale *riconoscimento* dello stimolo con l'aggiunta di un simbolo verbale/grafico.

Nel caso dell'*udito* le informazioni sono costituite: dalla diversa intensità e dal ritardo con cui il rumore/suono raggiunge le due orecchie; dalla rotazione delle orecchie (negli animali che le possono muovere); e dalla qualità del suono (frequenza, tono ecc.).

Nel caso della *vista* le informazioni sono costituite: dalla distribuzione bidimensionale delle immagini sulle retine; dalla rotazione degli occhi (negli animali che possono ruotarli); e da tutte le informazioni visive dell'ambiente osservato (forme, dimensioni, colori, movimento). Oltre che dai movimenti occhi-testa.

Nel caso della sensorialità *tattile* (questa parola appare molto riduttiva per questa modalità sensoriale che raggiunge quasi la risoluzione visiva nella interpretazione dell'ambiente esplorabile) la rappresentazione corticale in S1 è la conseguenza dell'integrazione di informazioni provenienti da strutture diverse del corpo: la zona del corpo che viene in contatto con gli oggetti dell'ambiente, la densità recettoriale dei sensori tattili, e termodolorifici cutanei di quella zona, la loro specificità qualitativa (temperatura, pressione, dolore), l'estensione della superficie di contatto con lo stimolo, i suo spostamento, che se non correlato con le informazioni propriocettive muscolo-scheletriche dei movimenti esplorativi del proprio corpo (arti, mani), definiscono che l'oggetto è in movimento rispetto al corpo. Qualcosa di simile alla *copia efferente* presente nel sistema occhi testa già descritto.

Ripetiamo: le strutture sensoriali corticali classificano (riconoscono) e localizzano con precisione oggetti ed eventi nell'ambiente utilizzando informazioni corporee (endocettori) ed extracorporee (exocettori), oltre alle memorie di sensorialità già esperite. Le aree uditive, visive e somatiche sono organizzate tutte in modo simile, mentre *olfatto* e *gusto*, più primitivi e molto ben rappresentati nel paleoencefalo sono meno rappresentati in corteccia, perché i loro sensori sono assiali, circoscritti e posti all'interno di cavità

del capo, e la posizione dello stimolo (molecolare) coincide con la sede dei recettori che quindi è implicita.

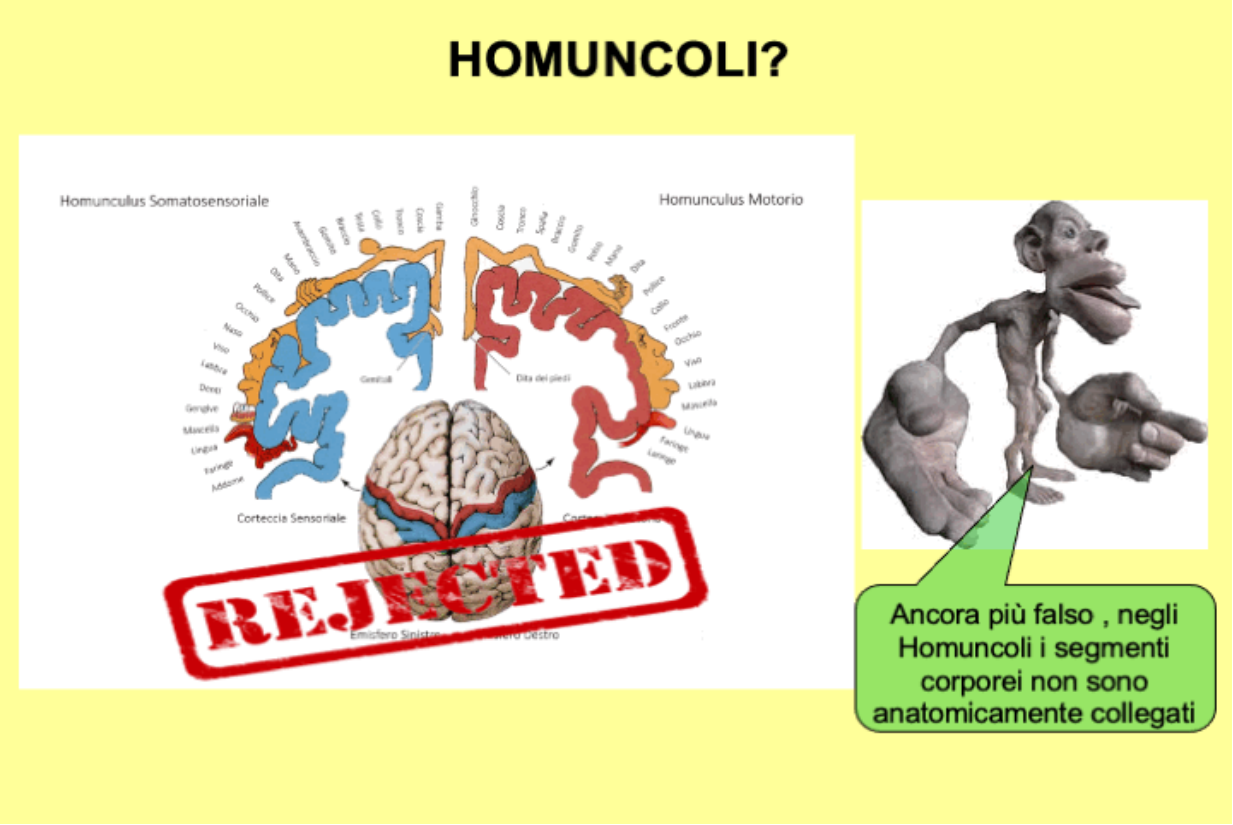


Fig. 41. Gli *homuncoli* corticali non esistono!

Come pensiamo che i neuroni corticali sensoriali S1 codifichino le caratteristiche degli oggetti toccati e quale parte del corpo li tocca, parimenti pensiamo che i neuroni motori M1 codifichino non l'azione dei singoli muscoli, ma traiettorie adattate al contesto, da eseguire con *gli arti o con estensioni di questi* (strumenti vari: bastoni, pinze, pennelli, tastiere ecc.). Basti pensare alla diversità delle sequenze muscolo-articolari necessarie a disegnare una stessa figura, o scrivere una parola, con una penna su un piccolo foglio orizzontale, o con un gesso su una grande lavagna verticale: la figura o la parola, la traiettoria appunto, rimangono identiche o quasi, ma i movimenti dei segmenti corporei per tracciarle sono assai diversi. Allora l'omuncolo in M1 è in piedi o seduto? E ha in mano la penna o il gesso? … "Ma mi faccia il piacere!" direbbe Totò.

Vogliamo essere ancora più diretti. Nelle cortecce è rappresentata la propria *interazione con il mondo, non il proprio corpo*: l'interazione sensoriale nelle cortecce posteriori e l'interazione motoria in quelle anteriori. *Gli omuncoli corticali non esistono e non devono essere più nominati* (Fig. 41).

Sappiamo che a leggere queste parole qualcuno salterà sulla sedia, ma siamo convinti di quanto affermiamo. Nel XVII secolo il *preformismo* sosteneva che nello spermatozoo era presente un

piccolissimo omuncolo preformato (Fig. 42) che si sarebbe compiutamente espanso nel ventre materno. Vogliamo continuare a vedere omuncoli ovunque?

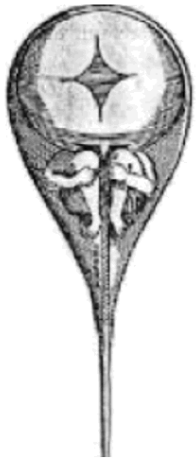


Fig. 42. Preformismo nello spermatozoo.

Inoltre non è un caso che le aree visive corticali siano molto distanti dalle aree motorie corticali, dato che si occupano di caratteristiche del mondo non necessariamente raggiungibili con gli arti, mentre quelle sensoriali somatiche sono molto prossime a quelle motorie, perché le caratteristiche tattili dell'ambiente, la tessitura o la temperatura di una superficie, la sua tridimensionalità, sono esplorabili appunto con movimenti della mano, e probabilmente sono necessarie brevi e quindi rapide connessioni tra questi diversi gruppi di neuroni sensoriali e motori per guidare un'azione efficace.

La visione classica è che le aree corticali motorie codifichino direttamente sequenze motorie volontarie. Abbiamo proposto invece che codifichino traiettorie adattate al contesto, e precisiamo: non come sequenze muscolari, ma come sensorialità propriocettive da ottenere (il futuro risultato sensoriale dello stato degli arti a movimento effettuato, secondo l'ipotesi del *Principio Ideo-Motorio* di W. James, v. anche cap. 30 *Sperimentazioni con reti neurali artificiali* e cap. 33 *ARM*), e deleghino le strutture motorie paleoencefaliche sottostanti a codificare ed erogare l'effettiva sequenza motoria muscolare. Per intenderci: non "voglio *prendere* quel frutto", ma "voglio *sentire* il mio braccio esteso con il frutto in mano" (Figg. 43, 44, 45).

Fig. 43. Competenze delle aree corticali sensoriali S1 e motorie M1.

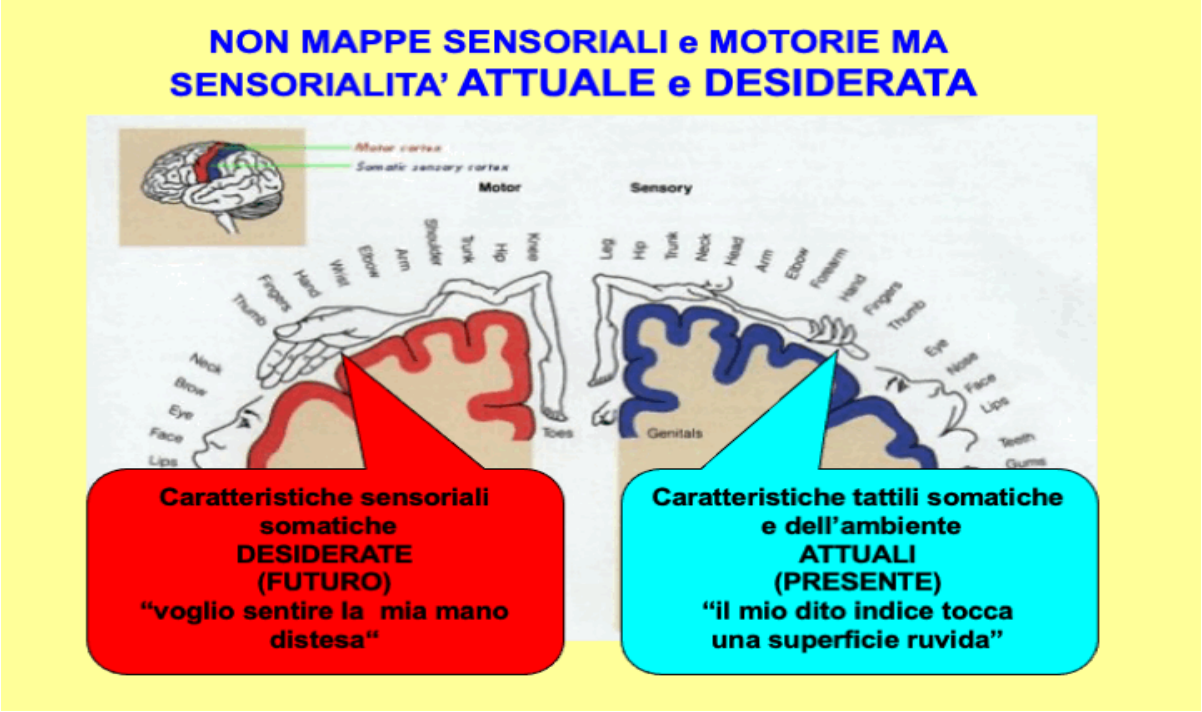


Fig. 44. Non mappe!

Sì, è un po' complicato; il concetto verrà descritto meglio quando parleremo del modello a tripletta associativa (v. cap. 28 *Learning-by-doing*). Questo obiettivo di azione non è necessario che sia cosciente: può essere elicitato dalle afferenze sensoriali delle aree posteriori in modo automatico. Sarà comunque più preciso di un movimento paleoencefalico, in quanto il pattern sensoriale corticale, la scena, è più definito di quello talamico, comprendendo caratteristiche ambientali più dettagliate e fenotipicamente apprese non disponibili a livello paleoencefalico. E le aree premotorie? Quelle un poco più anteriori di M1, che mostrano di attivarsi quando si pensa ad un movimento proprio o altrui? Queste sono le aree dei *neuroni specchio* (*mirror neurons)*, di cui parleremo nel cap. 29 *Neuroni canonici e neuroni specchio*.

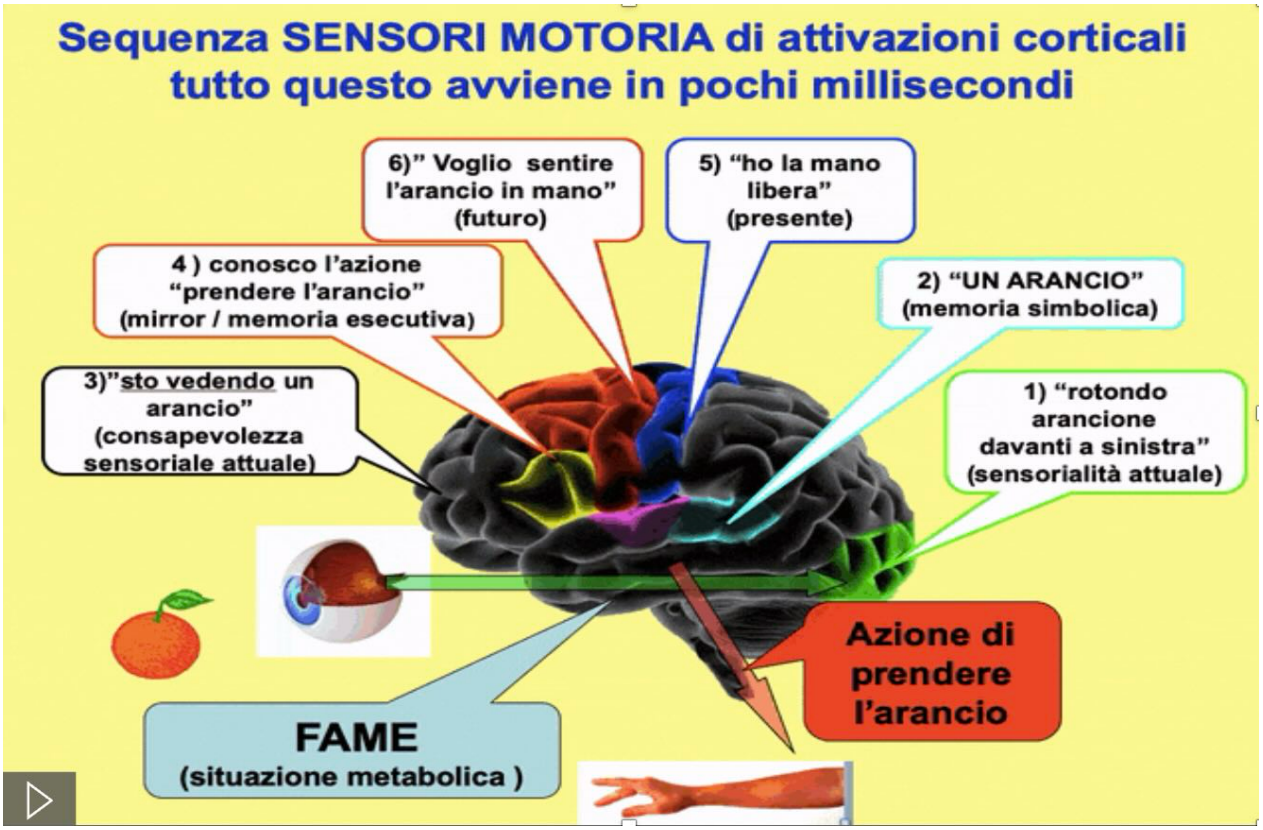


Fig. 45 (animata). Sequenza di attivazioni di aree cerebrali durante un comportamento sensori motorio appreso.

Per continuare la definizione dei livelli precedenti: le cortecce associative *vedono* il paleoencefalo ed agiscono su esso. Inoltre, essendo le connessioni ricorrenti e la retroazione a livello corticale molto rilevanti, a questo livello le memorie sono importanti quanto le afferenze talamiche nel classificare il contesto sensoriale. Si classifica quello che già si conosce o che gli assomiglia molto).

Le cortecce sensoriali posteriori e mnesiche *vedono* la *scena paleoencefalica*, e riconoscono e classificano alcuni particolari di questa attribuendone significati personali in basa all'esperienza individuale utilizzando riflessi condizionati (*scena corticale*) per agire *contestualmente* nell'ambiente con l'esperienza del *passato*, ancora senza consapevolezza.

4° livello: le cortecce prefrontali:
la macchina del tempo e la tripletta consapevole

Questi 100 grammi, più o meno, di corteccia sono davvero ancora nella nebbia; ma tutte le evidenze dicono che noi siamo questi 100 grammi. È dal funzionamento di queste cortecce che emergono il sentimento, la coscienza e il pensiero. Ma come si realizzano queste funzioni è ancora oggetto di speculazioni. Nel libro "*Coscienza Artificiale 2009*" abbiamo proposto le nostre ipotesi con la presunzione di averne iniziato una verifica sperimentale con modelli informatici. Se le cortecce sensoriali si occupano delle interazioni con il mondo *percepito*, anche se categorizzate automaticamente secondo memorie precedenti, ci sono forti indicazioni che la corteccia prefrontale si occupi anche e forse prevalentemente degli **effetti sulla propria persona** delle interazioni, *reali* o *immaginate,* con il mondo. Mentre la sensorialità paleoencefalica innesca nelle memorie associative delle aree sensoriali e mnesiche posteriori (parietali, occipitali e temporali) solo scene legate al contesto attuale, le cortecce prefrontali possono rappresentare anche scene *non legate al contesto*, ossia ricordate o immaginate, e che sono riconosciute come tali in quanto diverse dalla sensorialità contestuale. Abbiamo già detto che è questa diversità che consente di effettuare la scelta consapevole del comportamento più adeguato. È questa diversità inoltre che permette di costruire un passato, un presente ed un futuro: il *tempo* è rappresentato qui.

Un'altra differenza funzionale rispetto alle aree sensoriali e mnesiche posteriori è che, mentre in queste le rappresentazioni sono sì plastiche nel tempo (apprendimento, memoria implicita), ma rimangono anatomicamente localizzate in aree ben definite (visive, acustiche, somatiche, ecc.), ognuna attivata da un unico e sempre medesimo tipo specifico di afferenza sensoriale (vista, udito, tatto, ecc.), in quelle prefrontali le rappresentazioni sono mutevoli nella sensorialità rappresentata e fugaci nel tempo, consistenti in dinamiche combinazioni di attivazioni e inattivazioni neuronali, non in modificazioni plastiche più stabili come nelle aree mnesiche posteriori, è come una lavagna dove si disegna e si cancella continuamente quello che si vuole, una struttura neuronale assai diversa da tutte le altre.

Abbiamo proposto che il *sentimento,* la percezione di un'emozione, *rappresentata* nelle reti neuronali prefrontali sia la prima manifestazione di consapevolezza, presente anche in altre specie diverse da H. Sapiens, e che probabilmente è la conseguenza di un confronto automatico tra la rappresentazione della memoria più recente della propria persona (**io prima**) con la rappresentazione della propria persona attuale (**io adesso**) conseguente l'attivazione emozionale paleoencefalica. Di nuovo la **tripletta** in azione (io prima > riflesso emotivo> io adesso) con il conseguente apprendimento del nesso tra la causa del riflesso e l'effetto, il mio stato finale.

Pensiamo che l'aggiornamento di queste rappresentazioni prefrontali sia molto veloce, pochi millisecondi, cosicché il confronto tra due istanti successivi produca un segnale di "cambiamento" del proprio stato, e questo rappresenti l'effetto sulla propria persona a seguito del riflesso emotivo e costituisca il *sentimento* "**ora io ho paura** "oppure "**ora io sono felice**",

In sistemi neuronali più evoluti compare la possibilità di immaginare stati sensoriali non contestuali e quindi in un dato momento nelle medesime reti prefrontali può essere rappresentata una sensorialità attuale, "sento una musica", in altri momenti un ricordo, "ricordo una mela" o un'immaginazione, "immagino un pesce parlante", o un progetto, "andrò al cinema", e anche in questo caso il contenuto dell'immaginazione implicitamente comprende lo stato sensoriale attuale della propria persona "**io adesso penso**". È questa possibilità immaginativa che permette comportamenti intenzionali (volontà) immaginandone i risultati.

Le strutture prefrontali *vedono* dunque tutte le altre strutture corticali e sottocorticali che hanno già abbondantemente filtrato, classificato e memorizzato le precedenti afferenze sensoriali, e costruiscono una *scena prefrontale* consapevole incentrata quadridimensionalmente (spazio e tempo) sugli *effetti* dell'interazione ambientale, anche ricordata/immaginata, sulla propria persona. Possono quindi immaginare (prevedere) gli effetti sulla propria *persona* di *eventi futuri* ambientali compreso il proprio comportamento.

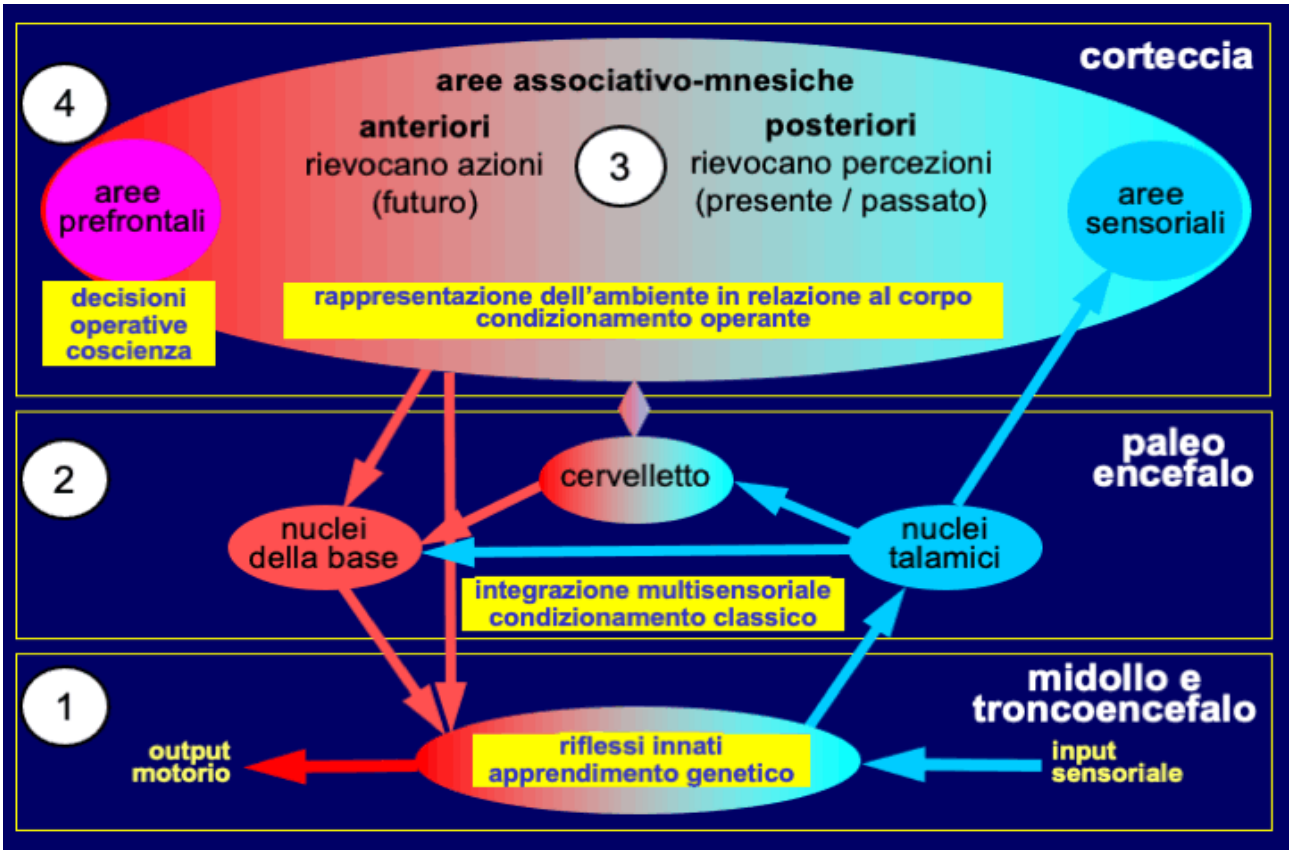


Fig. 46. Organizzazione gerarchica del sistema nervoso. 1) 1° livello: midollo; 2) 2° livello: paleoencefalo; 3) 3° livello: cortecce sensoriali, associative-mnesiche e motorie; 4) 4° livello: cortecce prefrontali

Le Figg. 46 e 47 mostrano l'organizzazione gerarchica del sistema nervoso, nei confronti del comportamento, che proponiamo e che abbiamo descritto nei paragrafi precedenti.

Ci rendiamo conto che questa descrizione dell'organizzazione gerarchica del sistema nervoso evoluto è un'ipotesi non ancora suffragata da riscontri sperimentali biologici certi, ma ci sembra che costituisca un forte cambiamento di prospettiva d'indagine che potrebbe indirizzare in modo più utile gli studi neurofisiologici. Se non altro questo modello offre una possibilità di comprendere il funzionamento encefalico globale altrimenti inesistente con gli attuali paradigmi.

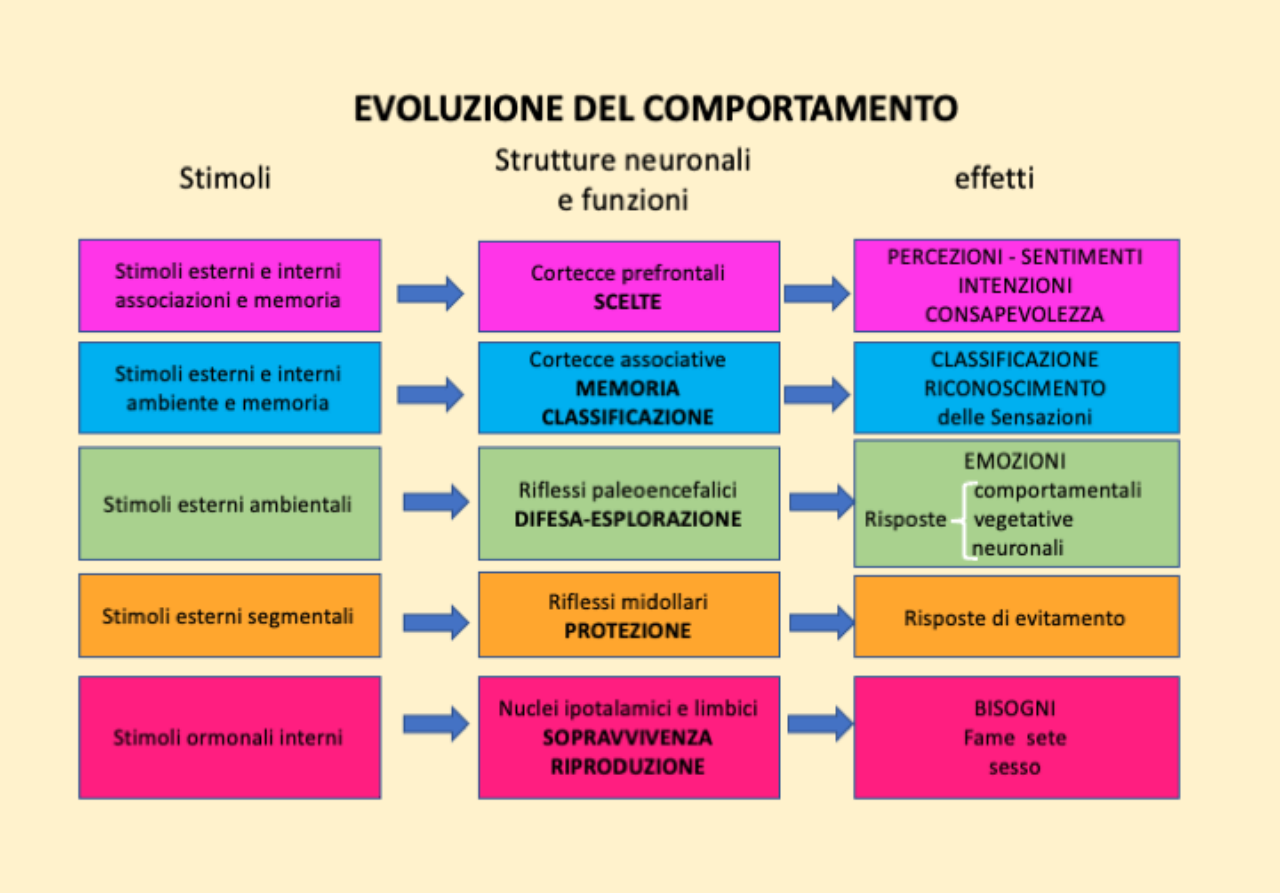


Fig. 47. Dalla soddisfazione di *bisogni elementari* al comportamento intenzionale cosciente.

Riassumendo

Midollo/troncoencefalo: Riflessi congeniti: comportamento automatico stabilizzato di risposta a stimoli ambientali contestuali invarianti per la specie.

Paleoencefalo: riflessi condizionati classici e riflessi emotivi, reazione automatica al contesto sensoriale globale attuale: emozioni, ovvero trasformazione delle afferenze sensoriali in sequenze comportamentali motorie, endocrine ed esocrine (movimento, attivazione cardio-surrenalica, sudorazione, ecc.). Tali effetti possono essere modulati dalle attività corticali superiori. *Scena paleoencefalica*.

Cortecce sensoriali ed associative-mnesiche (posteriori, postrolandiche): Percezione non consapevole, interazione ambientale, riflessi condizionati operanti, riconoscimento, classificazione di fatti, oggetti ed eventi, che modulano inconsapevolmente il comportamento sulla base delle esperienze memorizzate (passato)*: scena corticale sensoriale*.

Cortecce motorie (anteriori, prerolandiche): avvio delle proprie azioni attraverso la rappresentazione delle loro conseguenze sensoriali. Principio Ideo-Motorio di James.

Cortecce premotorie (anteriori, fra le prerolandiche e le prefrontali): rappresentazione del nesso causale che può generare un'azione (neuroni canonici) e del proprio futuro sensoriale *conseguente* ad azioni proprie o anche altrui (neuroni specchio).

Cortecce prefrontali (anteriori, polo frontale): percezione consapevole, sentimento e consapevolezza, comportamento intenzionale**,** valutazione degli effetti dell'interazione ambientale contestuale o immaginata sulla propria persona per effettuare scelte operative distinguendo tra *immaginazione e percezione della realtà.* Un effetto di questa funzione è la *Scena prefrontale consapevole* che permette la *previsione* del comportamento più utile.

.

20. LE MANI DELL'UOMO

Le mani fanno l'uomo. Qualcuno potrebbe dire: "banale, allora le zanne fanno il leone e le pinne fanno il delfino". Non è esattamente la stessa cosa: le mani dell'uomo modificano intenzionalmente il mondo. La manipolazione, e il disegno prima del linguaggio, hanno cominciato a costruire un ambiente artificiale progressivamente e retroattivamente sempre più complesso, tanto che ora viviamo praticamente solo in questo. Ovviamente le mani dell'uomo presuppongono un cervello che le controlla ed è chiaro che le due strutture sono coevolute. La progettualità e la destrezza sono state la combinazione vincente che, nel bene e nel male, ha prodotto la specie dominante su questo pianeta. La tecnologia prima della scienza è stata la base del crescente miglioramento della qualità della vita; più efficace sfruttamento delle risorse, la salute è migliorata, la vita si è allungata, nella maggioranza degli umani molte sofferenze sono diminuite, e il numero degli umani è, ahimè, cresciuto esponenzialmente. Ma quello che negli ultimi anni comincia ad apparire strano, almeno negli ambienti tecnologicamente più avanzati, è la progressiva tendenza a sminuire l'importanza della manipolazione e del lavoro manuale, privilegiando viceversa il lavoro intellettuale, ed anche la Scuola è su questa traccia. Crediamo che questo atteggiamento sia sbagliato. La nostra corteccia prefrontale è lì per *progettare azioni ed eseguirle*. Se l'esecuzione è delegata ad altri, umani o artificiali, la percezione degli effetti può venire a mancare, o comunque diminuire di efficacia nel correggere la progettazione, e questo non è contemplato nel processo evolutivo. In particolare nell'età evolutiva i bambini devono esplorare l'ambiente correlando **tutte** le informazioni sensoriali che progressivamente si vanno sviluppando (vista, udito, tatto, olfatto, gusto ed equilibrio). Da qualche decennio la tendenza scolastica ed extrascolastica è quella di orientare i piccoli verso l'utilizzo di display multimediali (che multimediali non sono affatto perché stimolano solo vista e udito, il tatto è relegato all'uso di una tastiera o al contatto sullo schermo assai diverso dal tatto con gli oggetti della realtà rappresentata, per non parlare del gusto, olfatto ed equilibrio del tutto assenti). È stato ampiamente dimostrato che questa modalità di intrattenimento danneggia l'apprendimento talvolta in modo permanente (Spitzer 2014) ma i Dirigenti Scolastici e gli stessi genitori non sembra se ne siano ancora accorti.

Il lavoro manuale finalizzato (coltivare la terra o costruire una macchina) è appagante, mentre quello intellettuale è ansiogeno, e non è un caso. Normalmente il lavoro intellettuale (progetto), come si è detto, precede quello manuale, l'ansia correlata è utile e costituisce la spinta ad agire; ma se l'azione non segue, l'ansia può crescere e produrre danni e sofferenza. Certo l'osservazione del buon risultato, anche se eseguito da altri, conclude la sequenza progettata; ma il grado di soddisfazione è sicuramente minore. Queste semplici constatazioni ci confermano la presenza di una *tripletta*: progetto, azione, risultati, e del suo funzionamento retroattivo. Abbiamo descritto quanto questa tripletta sia la base per la comprensione del funzionamento del sistema nervoso quando effettua una azione intenzionale.

Controllo motorio

Per eseguire un movimento utile è indispensabile conoscere la collocazione del proprio corpo nell'ambiente e la posizione dei propri segmenti corporei (schema corporeo). Il sistema nervoso anche degli animali più primitivi opera automaticamente la trasformazione di tutte le afferenze sensoriali in attivazione degli effettori adeguati. Le retroazioni all'interno delle reti neuronali, all'interno del corpo e al di fuori del corpo, nell'ambiente, sono indispensabili sia nella fase di apprendimento che in quella di esecuzione anche automatica. Solo in alcuni movimenti molto ben appresi, geneticamente o fenotipicamente, le retroazioni possono essere molto ridotte (movimenti ballistici: gesti sportivi e musicali), ma non assenti.

Sistemi piramidale ed extrapiramidale

La manipolazione e l'articolazione della parola sono attuate da un sistema motorio che riceve i suoi comandi solo dalla corteccia, più precisamente da certi neuroni di forma piramidale localizzati anteriormente alla scissura Rolandica nell'area M1, ed è per questo detto *sistema piramidale*. Le fibre nervose di questi neuroni arrivano direttamente e senza interrompersi ai neuroni motori del troncoencefalo e del midollo.

Le altre attività motorie umane sono invece attuate da un altro sistema motorio, detto per contrasto *extrapiramidale*, evolutivamente più antico, largamente inconscio, che riceve i suoi comandi da strutture sottocorticali paleoencefaliche (gangli della base, cervelletto, nucleo rosso). Nei comuni testi di neurologia questo sistema è spesso relegato in secondo piano e liquidato in poche pagine con la descrizione riduttiva dei suoi compiti di controllo sull'equilibrio, la deambulazione e i movimenti automatici (come se fossero controlli da poco!). Ma in realtà questo è un formidabile *autopilota* adattivo e reattivo, che gestisce la maggior parte delle nostre interazioni con l'ambiente, e che per peso e numero di neuroni supera di gran lunga il sistema piramidale, e negli animali meno evoluti costituisce il principale, in certi casi l'unico, sistema di controllo motorio.

Qualcuno potrebbe chiedersi perché, mentre le vie sensoriali sembrano rispettare senza eccezioni l'organizzazione gerarchica stratificata che abbiamo descritto (non risultano infatti esservi vie sensoriali che raggiungano la corteccia senza prima interrompersi nel paleoencefalo, e più precisamente nel talamo e nei corpi genicolati), per le vie motorie esista invece la via piramidale a consentire ad alcune strutture corticali un accesso diretto ai neuroni motori troncali e midollari senza interrompersi nei livelli gerarchici sottocorticali. Perché la via motoria piramidale non utilizza le stazioni paleoencefaliche extrapiramidali, già così efficienti in velocità e precisione?

Questa asimmetria è spiegabile considerando che nell'uomo le funzioni a cui provvede essenzialmente la via piramidale sono la manipolazione ed il linguaggio, proprio quelle in cui è maggiore la differenza tra le prestazioni dell'uomo e degli altri animali, che si sono evolute parallelamente alla recente espansione della corteccia in particolare quella prefrontale. Quel che rende particolari le funzioni di manipolazione e linguaggio è l'intenzionalità e la rapida capacità di apprendimento (corticale), sicuramente superiore alla velocità di apprendimento dei sistemi extrapiramidali (paleoencefalici), e la

necessità di una retroazione sensoriale (feedback) in linea, in particolare visiva o uditiva. Si può imparare a pronunciare una nuova parola in un attimo, e un nuovo movimento manuale in poche ripetizioni; quindi la configurazione dell'attivazione dei neuroni di controllo motorio deve necessariamente poter cambiare rapidamente, e le reti di neuroni corticali hanno la capacità di farlo molto meglio di quelle paleoencefaliche e cerebellari, che richiedono numerose ripetizioni nel tempo, come ognuno sa pensando al lungo tempo di apprendimento necessario per i gesti sportivi o musicali. Per quanto riguarda il controllo con retroazione va considerato che nei gesti appresi e ripetitivi, preprogrammati, extrapiramidali, la retroazione in linea non è quasi necessaria (gesti ballistici), e d'altra parte il gesto è così veloce che non vi è il tempo per una modificazione in corso d'esecuzione. Al contrario, per i gesti manipolatori o linguistici, piramidali, la retroazione è indispensabile, per gli aggiustamenti continui nel corso dell'azione richiesti dalla necessaria precisione. Infilare un filo nella cruna di un ago è impossibile senza la guida visiva. Questa diversa organizzazione motoria richiede una forte cooperazione tra i neuroni corticali sensoriali e motori, e di nuovo non è un caso che le aree corticali sensoriali tattili siano cosi vicine e strettamente connesse con quelle motorie prerolandiche. Le stesse considerazioni valgono anche per il sistema del linguaggio. Persone nate sorde hanno difficoltà a pronunciare correttamente e velocemente molte parole che conoscono perfettamente, perché manca loro la retroazione acustica, ma sono in grado di scriverle correttamente e velocemente perché le retroazioni propriocettiva e visiva sono normali.

Si può dire che il sistema *extrapiramidale* è un sistema motorio lento nell'apprendimento ma stabile nel tempo, mentre quello *piramidale* è al contrario rapido nell'apprendimento ma labile nel tempo e i due sistemi cooperano perfettamente per una interazione ambientale molto efficiente.

Incrociamenti delle vie di trasmissione ascendenti e discendenti

In tutti gli animali con simmetria bilaterale dotati di encefalo si osserva un incrociamento delle vie somatosensoriali e di quelle motorie tra gli emisferi cerebrali e la periferia. La prima impressione è che questi incrociamenti non abbiano senso: perché delegare a strutture cerebrali di un lato il controllo sensoriale e motorio del lato opposto? L'evoluzione è necessariamente imperfetta nell'allestire strutture e funzioni, ma certamente elimina quelle controproducenti o inutilmente dispendiose. Quale può essere quindi il motivo del mantenimento di questa apparente inutilità? Finora nessuno è riuscito a spiegarlo con certezza, ma esistono un paio di congetture che vale la pena di menzionare.

La prima è conseguente all'osservazione dell'incrociamento visuo-motorio in organismi molto semplici. La comparsa evolutiva di exocettori (sensori per la rilevazione a distanza di fenomeni ambientali: per eccellenza la vista) in organismi molto semplici è stata di rilevanza notevole per la ricerca di nutrienti. Zone ambientali fortemente interessate da radiazioni luminose sono ricche di nutrienti biologici (organismi vegetali e altri organismi che si nutrono dei primi), per cui individuare e raggiungere zone illuminate costituisce un notevole vantaggio per nutrirsi e di conseguenza riprodursi. Semplici organismi nei quali i fotorecettori posizionati su un lato del corpo attivano direttamente strutture motorie del lato opposto (es. flagelli) con un incrociamento sensori-motorio diretto ottengono automaticamente lo scopo d'indirizzarsi verso la zona più illuminata con movimento serpeggiante. Una connessione non incrociata porterebbe al contrario ad allontanarsi automaticamente dalle zone illuminate. Questa

organizzazione crociata potrebbe essersi mantenuta anche in organismi più complessi, ma non spiega l'incrociamento che si mantiene anche nei mammiferi, ove la via sensori-motoria non è più cosi diretta.

La seconda consiste nella scoperta, fatta da Marc H. E. de Lussanet e da lui chiamata *Ancestral axial twist*, di una rotazione antioraria di 90° del polo anteriore della gastrula di organismi in formazione, rispetto ad una rotazione oraria, parimenti di 90°, del polo posteriore. Questo di fatto produce attorcigliamento del corpo con un incrociamento di tutte le strutture encefaliche rispetto al resto del corpo, ma non ne spiega la ragione. Ci fa piacere lasciare qualcosa da scoprire alle nuove generazioni di ricercatori!

Lateralizzazioni

Evidentemente avere due arti superiori funzionalmente indipendenti ma cooperanti si è dimostrato un grande vantaggio evolutivo e, per qualche motivo non ancora del tutto chiarito, la maggior parte degli individui manipolanti (scimmie-uomo) è destrimane, nel senso che la migliore capacità manipolatoria si è lateralizzata per l'arto superiore destro (destrezza appunto). Conseguentemente, per il su citato incrociamento delle vie motorie, l'area corticale motoria sinistra si è specializzata per il miglior controllo della manipolazione e successivamente del disegno e della scrittura. Questa emergente asimmetria è stata denominata *dominanza emisferica*. Morfologicamente e istologicamente le due aree corticali motorie (M1) destra e sinistra sono sostanzialmente identiche, salvo una ancora discussa lieve prevalenza ponderale di quella dominante. È interessante notare che le aree corticali relative alla sensorialità visiva, acustica e anche somatica non presentano asimmetrie funzionali, a conferma di quanto abbiamo asserito in precedenza, visto che la ruvidezza di una superficie non cambia se la percepisco con la mano destra o sinistra. Queste asimmetrie compaiono invece in aree dedicate all'estrazione di significati simbolici provenienti dalle suddette aree sensoriali, come ad esempio le aree sensoriali del linguaggio, che sono lateralizzate come quelle motorie. Molto si può speculare sulla localizzazione della manipolazione e del linguaggio nello stesso lato: è consistente l'ipotesi che il linguaggio articolato sia una evoluzione dell'espressione intenzionale simbolica come la gestualità e il disegno. L'asimmetria del versante sensoriale del linguaggio, anch'essa omologamente localizzata in aree corticali sinistre lievemente posteriori a quelle motorie, può essere giustificata dalla convenienza di rapide correlazioni sensori-motorie in ambito linguistico, e quindi della utilità di connessioni più corte possibile tra le popolazioni neuronali competenti per aspetti diversi della stessa funzione.

Cosa accade a livello delle aree premotorie? Qui i dati sperimentali sono assai meno definiti, ma la sensazione è che anche per queste sussista un'asimmetria funzionale fra i due lati. In modo non ancora sufficientemente provato si può azzardare che la corteccia premotoria destra codifichi la percezione di significati di scene ambientali contestuali o memorizzate, e la corrispettiva corteccia sinistra codifichi progetti di comportamento su queste in base a esperienze accumulate. Questa ipotesi è corroborata da deboli informazioni e correlazioni comportamentali conseguenti a lesioni accidentali occorse separatamente nelle due aree su menzionate, e da altrettanto deboli informazioni ottenute da neuroimmagini funzionali su soggetti sani o affetti da patologie neurologiche o psichiatriche. A questo proposito si aprirebbe l'enorme capitolo delle patologie psichiatriche umane, che non ha corrispettivo in animali appena meno evoluti di noi. Ma non abbiamo intenzione di addentrarci nell'argomento.

Rimarremo in superficie accennando alla probabilità che la maggior parte di queste patologie consegua ad uno squilibrio relativo fra ipofunzione delle strutture prefrontali ed iperfunzione di certe altre strutture encefaliche, segnatamente quelle del *sistema limbico*. Possiamo dire che le patologie psichiatriche hanno a che fare con una disfunzione dell'attribuzione di realtà e corretto significato alle azioni altrui, agli eventi ambientali, e/o alle proprie afferenze sensoriali e mnesiche (allucinazioni) ed emotive. Insomma la corteccia prefrontale ci fa essere umani efficienti, ma in alcuni casi sfortunati pregiudica il funzionamento di tutto il resto che l'evoluzione ha pazientemente costruito in milioni di anni.

21. IL TEMPO

Dovremmo aprire un lungo capitolo sulla percezione del tempo, ma pensiamo sia meglio riferire solo qualche notizia lasciando gli interessati all'argomento ad altri saggi più approfonditi e dettagliati.

Il concetto di direzione del tempo non invertibile dipende dal fatto che abbiamo una "memoria" e conseguentemente osserviamo che nulla può tornare come "ricordavamo" un momento prima, e siccome siamo curiosi e cerchiamo un "perché" (vedi emozioni) parliamo di cause ed effetti. Ma per un sistema che non ha memoria le cose possono essere assai diverse, per questo sistema, semplicemente, le cose cambiano in continuazione. Se non c'è memoria il tempo non esiste e quindi non c'è più causa, effetto né retroazione dell'effetto, c'è solo un "presente" in continuo cambiamento. E tra i sistemi "smemorati" ce ne uno che si chiama **evoluzione** che funziona benissimo, e che ha prodotto automaticamente tutto quello che c'è stato e c'è nell' universo conosciuto, cervelli consapevoli compresi!

Culturalmente abbiamo distinto un tempo *oggettivo* da un tempo *soggettivo:*

il *tempo oggettivo* è quello che utilizziamo per definire i cambiamenti morfologici e spaziali nell'ambiente esterno. Alla nostra scala pensiamo sia un'entità costante, tanto da misurarlo con strumenti più o meno precisi, dalla meridiana all'orologio atomico, ma vi sono dubbi assai rilevanti tanto che la fisica teorica ipotizza la reversibilità o la inesistenza del tempo a livello subatomico. Ma non osiamo addentrarci in ambienti a noi sconosciuti.

Il *tempo soggettivo* invece è la nostra percezione del tempo che passa. Non abbiamo un sensore del tempo: misuriamo il tempo tramite la misura dello spazio percorso da oggetti in movimento tramite la **velocità** del cambiamento, (l'ombra di un oggetto esposto al sole, la lunghezza di una candela che si consuma, la sabbia che scende in una clessidra, l'angolo tra le lancette di un orologio, ecc.).

"*Il tempo è percepito dal movimento delle cose*" (Lucrezio, *De rerum naturae*).

Questa percezione di *movimento* è sicuramente possibile che avvenga inconsapevolmente nelle cortecce sensori/mnesiche posteriori ma, come abbiamo detto, la classificazione del tempo in *presente, passato e futuro*, è solo possibile quando compaiono evolutivamente strutture corticali (prefrontali) in grado di rappresentare consapevolmente sensorialità anche non contestuali (memorie o immaginazioni)

Al contrario del tempo oggettivo, il tempo soggettivo è molto variabile e dipende da parametri fisici individuali come la temperatura corporea, il metabolismo e lo stato psichico (ansia, tranquillità, attenzione, noia, e varie condizioni patologiche). Libet ha dettagliatamente dimostrato che la *percezione cosciente* di uno stimolo sensoriale, dovuta all'attivazione delle cortecce prefrontali, è in ritardo di qualche centinaio di millisecondi rispetto all'attivazione corticale proveniente dai sensori periferici; come dire: percepiamo il passato come se fosse il presente. Ma c'è di più: la percezione cosciente di contemporaneità tra due stimoli tattili erogati contemporaneamente uno sul capo e uno su un piede viene *costruita* dalle reti neurali prefrontali, perché in realtà lo stimolo sul capo raggiunge la corteccia sensoriale una trentina di millisecondi prima di quello proveniente dal piede. O ancora, la vista di uno stimolo su di una mano e la percezione del suo contatto appaiono anch'essi contemporanei, sebbene le vie sensoriali tattili e visive abbiano tempi molto diversi. Per non parlare della percezione di contemporaneità di uno stimolo acustico e uno visivo se questi sono molto prossimi, pochi metri, anche se quello acustico raggiunge la specifica corteccia sensoriale dieci volte prima di quello visivo. Questa sfera di contemporaneità si estende per una quindicina di metri rispetto al capo; oltre questa distanza la velocità oggettiva di propagazione dei due fenomeni diventa rilevante e la percezione non è più contemporanea (lampo e tuono).

Questa manipolazione del tempo soggettivo serve principalmente per interpretare al meglio le correlazioni causa-effetto utili alla propria sopravvivenza che dipendono da molti fattori individuali, tra i quali soprattutto le precedenti esperienze del fenomeno in osservazione. Insomma il tempo soggettivo è veramente elastico e personale, ed ha poco a che fare con la realtà fisica degli eventi. Il fatto che per la misura del tempo sia necessario utilizzare entità spaziali o numeriche (il tempo è lungo o breve, un giorno è fatto di 24 ore ecc.) suggerisce che la sua natura non sia fisica, ma mentale. Il tempo soggettivo consente un ordinamento in sequenza degli eventi che percepiamo, utile per la *previsione* di quelli che percepiremo. Probabilmente l'inizio di questa funzione è emerso dalla ricerca di un *prima* e un *dopo* per definire un nesso di causalità tra eventi ambientali in successione (un sasso che cade, un fuoco che ustiona) o per prevedere lo spostamento di una preda o di un predatore. Diversamente, alcuni cambiamenti lenti alla nostra scala come i cicli circadiani o circamensili conseguenti a cicli metabolici più o meno sincronizzati con variabili fisiche planetarie (illuminazione, temperatura ecc.) non sono contemplati nella rapida comunicazione delle reti neuronali cerebrali e quindi non fanno parte del nostro tempo soggettivo cosciente.

22. MEMORIA E APPRENDIMENTO

In questo capitolo analizziamo alcune funzioni generali del sistema nervoso che serviranno per comprendere meglio le sperimentazioni che abbiamo effettuato con modelli dinamici a reti neurali artificiali

Fig. 48. (animata) memorie artificiali e biologiche. La scacchiera (in basso o a destra) di sole 14 x 14 righe e colonne, per un totale di 196 quadratini bianchi e neri, consente 10^{59} combinazioni differenti: un deposito enorme di memorie possibili.

La memoria nel sistema nervoso è un processo conseguente lo stato dinamico di attivazione di grandi quantità di neuroni le cui connessioni sono state rimaneggiate in quantità e qualità dalle esperienze personali, cosicché diverse configurazioni (rappresentazioni-ricordi) possono generarsi in funzione delle modalità d'innesco-rievocazione (memorie associative, vedi più avanti). È necessario smettere di pensare che esistano nel sistema nervoso strutture deputate esclusivamente ad archivio di ricordi: qualche neurone, o qualche gruppo di neuroni, normalmente inerti, che si attivano quell'unica volta

nella vita che mi ricorderò del nome o del volto di un compagno di scuola. Questa interpretazione è la seconda peggiore conseguenza della forzata similitudine tra calcolatore digitale e cervello biologico che ci è stata propinata per decenni (la prima, più subdola, è il nuovo dualismo hardware–software, il dualismo mente–cervello in versione mascherata che continua a cercare di rientrare dalla finestra) (Fig. 48).

Ogni specie è equipaggiata con i sensori adatti e necessari alla propria sopravvivenza, che provvedono ad una prima rappresentazione della scena ambientale individuale, ben lontana dalla complessità della scena reale. Basti ricordare quanto abbiamo detto a proposito della percezione visiva umana, limitata ad una strettissima banda di tutte le radiazioni elettromagnetiche che costantemente bombardano il pianeta.

Dunque la prima rappresentazione nei neuroni midollari in connessione con i sensori periferici specifici è già molto riduttiva rispetto alla realtà ambientale, e ad ogni trasmissione alle stazioni neuronali successive (paleoencefalo, cortecce) viene ulteriormente filtrata e modificata dall'interferenza con altre rappresentazioni interne. Questa configurazione, se ripetuta, può modificare le connessioni di gruppi neuronali e questa modificazione produce una memoria dell'evento. Pensiamo però che tutte le definizioni semantiche di memoria implicita, esplicita, fenomenica, episodica ecc., per quanto utili sul piano didattico e descrittivo del comportamento, in realtà siano una descrizione di tappe di una funzione neuronale progressiva che filtra e arricchisce simbolicamente la scena ambientale personale partendo dai neuroni sensoriali periferici per finire in quelli delle cortecce prefrontali, che nell'uomo permettono la consapevolezza della scena percepita o immaginata (*scena prefrontale*).

La distinzione tra memoria implicita e memoria esplicita è classicamente fondata sulla possibilità di trasmissione simbolica (poter descrivere) di quella esplicita con conseguente assunzione che, nell'uomo, questa sia l'unica memoria collegata con la consapevolezza. Ma anche la memoria implicita (saper fare) può essere consapevole, anche se non facilmente trasmissibile. "Vado in bicicletta", e ne sono cosciente, ma non riesco a trasmettere come si fa in modo che l'ascoltatore possa sapere come fare. Per la memoria esplicita viene posto l'accento sul fatto che sia simbolica; ma appena uno stimolo sensoriale viene trasmesso dai recettori ai primi neuroni sensoriali midollari viene tradotto in una rappresentazione neuronale, a questo livello sicuramente non cosciente, ma pur già simbolica, nel senso che *rappresenta* lo stimolo (o più probabilmente certe sue caratteristiche rilevanti), in una codifica, un pattern di attivazioni neuronali. Per una rappresentazione di questo tipo è preferibile usare il termine *sub-simbolica*, intendendo con questo che non è un simbolo trasmissibile. Tale rappresentazione, come abbiamo detto, viene progressivamente arricchita e conformata nelle stazioni neuronali successive (talamo e cortecce sensoriali), ma solo nelle cortecce prefrontali assume le caratteristiche simboliche (classificazione) trasmissibili volontariamente.

Tipi di memoria

Per rendere più comprensibile l'argomento è utile ampliare un poco le definizioni di memoria già date nel cap. 5 *Definizioni*.

Memoria genetica (o genotipica)

Definiamo con questo termine la capacità, già cablata alla nascita nelle varie strutture del sistema nervoso, di eseguire comportamenti preprogrammati utili alla sopravvivenza in conseguenza di determinate configurazioni sensoriali contestuali (stimoli). Sono comportamenti riflessi, anche molto articolati nello spazio e nel tempo, come azioni di migrazione, evitamento, fuga, attacco, accoppiamento, costruzione di nidi e tane, del tutto istintivi e reattivi al contesto (emozioni). La parola memoria è evidentemente utilizzata qui in modo molto estensivo, è una memoria esecutiva: questa memoria è della specie, non dell'individuo, è appresa per selezione naturale, ed è totalmente implicita, non cosciente.

Memoria fenotipica

Sinonimo di apprendimento individuale (o più precisamente *effetto dell'apprendimento individuale*). Richiede strutture neurologiche plastiche capaci di modificare le loro connessioni (in qualità, intensità, collocazione) a seguito dell'esperienza individuale, ad es. per distinguere cibi edibili e no, utilizzare oggetti come utensili, fino a padroneggiare mezzi di comunicazione (disegno, scrittura, parola… internet). Le strutture neurologiche particolarmente plastiche deputate a queste modificazioni strutturali sono anche alcune strutture paleoencefaliche, ma prevalentemente le cortecce cerebrali. Le modificazioni sinaptiche corrispondenti a questa memoria sono favorite dalla ripetizione dell'esperienza (*regola di Hebb*, da D.O. Hebb, 1949: ogni volta che due neuroni sono attivati contemporaneamente, le connessioni fra loro si rinforzano). Questo processo, un riflesso condizionato, inizia per prove ed errori e procede fino a diventare molto preciso ed automatico ed a funzionare quasi come una memoria genetica, anche se non così stabile. Nella specie Homo Sapiens la memoria fenotipica si può formare, oltre che per condizionamento, anche per *apprendimento cognitivo* (generalizzazione dall'esperienza personale, imitazione, cultura).

Memoria estesa

Le memorie su descritte si basano prevalentemente sul substrato biologico costituito da modificazioni sinaptiche più o meno persistenti e/o da attivazioni ricorrenti nella rete neuronale, ma anche sul costante recupero d'informazioni dall'ambiente circostante, che costituisce una sorta di *memoria esterna* (tracce del comportamento precedente, proprio e altrui, elementi culturali, manufatti, libri ecc.). La cultura rappresentata nell'ambiente costituisce un inesauribile serbatoio di memoria, appunto *estesa*, e condivisa, senza il cui continuo apporto, anche inconsapevole, l'uomo non è più tale. Sembra infatti che le dimensioni e la struttura dell'encefalo umano non siano mutate negli ultimi 30–40 mila anni, almeno da quanto si può dedurre dai reperti archeologici (volume e conformazione del cranio) e dai manufatti ritrovati (pitture murali, sculture e utensili) che denotano capacità percettive, simboliche e manipolative praticamente identiche a quelle dell'uomo attuale. All'opposto è indubbio che le

capacità interattive con l'ambiente siano vertiginosamente aumentate con andamento esponenziale ben visibile nelle ultime due centinaia di anni. Una spiegazione di questo fatto sembra da attribuirsi esclusivamente all'aumento progressivo della memoria estesa, all'accumulazione culturale nell'ambiente (Fig. 49).

Fig. 49. Rappresentazione dei tipi di memoria utilizzate da Homo Sapiens.

Si potrebbe concludere che l'aumento di complessità della specie presuppone inevitabilmente un aumento di dipendenza dall'ambiente circostante. D'altronde il recupero delle informazioni depositate da sé stessi o da altri individui nell'ambiente risulta essere un sistema estremamente efficace per migliorare il comportamento: il serbatoio d'informazioni è praticamente illimitato, viene continuamente rifornito e ottimizzato da tutti, non occupa risorse biologiche individuali, e ognuno attinge quello che serve nel momento in cui serve, ora più che mai!

Qualcuno però teme che avere a disposizione rapidissimamente e ubiquitariamente (Internet) un archivio immenso di memorie possa produrre un degrado della specie Sapiens, possa alla lunga atrofizzare i meccanismi mnemonici biologici. Se qualcosa costa e non è necessaria viene spazzata via dall'evoluzione. Già Socrate si preoccupava che l'avvento della scrittura e quindi lettura diminuisse le capacità dialettiche, e più finemente si preoccupava del fatto che un concetto scritto da qualcuno potesse essere mal interpretato da altri, insomma prevedeva un degrado della comunicazione, e

ammoniva “leggere non significa capire”. Non aveva tutti i torti. I giovani della generazione digitale, quelli che oggi hanno otto – dodici anni, si muovono nella “Rete” con velocità ed efficienza che pochi adulti raggiungono, e utilizzano per i compiti scolastici le informazioni che scaricano; ma siamo sicuri che ciò sia utile alle loro menti in formazione? L’impressione condivisa è che vengano addestrati alla ricerca superficiale ed al *copia e incolla* senza sforzo e senza comprensione. D’altronde da che mondo è mondo gli scolari trovano sempre le strade più comode per gabbare i maestri. Che fare? Quel che è certo che già ora il sistema è fuori controllo e probabilmente lo sarà sempre di più con la recente comparsa dei sistemi di Intelligenza Artificiale.

Come in molti altri aspetti dell’evoluzione culturale e tecnologica, sembra che l’eccesso si ritorca contro l’evoluzione biologica. Probabilmente la memoria estesa è utile se si utilizza all’interno di comunità di ridotte dimensioni (villaggi), dove infatti è comparsa; ma nessuno sa cosa accade quando la comunità è globale. Al solito: memi contro geni. Volendo poi immaginare scenari futuri, non necessariamente fantascientifici, si potrebbe supporre che l’evoluzione memetica abbia utilizzato l’uomo per costruire questo poderoso sistema di memoria estesa, ora già autoalimentante, in modo da poter essere utilizzato direttamente dal sistema stesso senza più la necessità dell’uomo.

Memoria operativa o di lavoro (working memory)

È una memoria temporanea di pochi secondi o minuti, che serve non a *rievocare* esperienze come le precedenti, ma *ad eseguire* compiti articolati innescati da sensorialità contestuali o da memorie genetiche o fenotipiche. Utilizza una retroazione interna alla rete che pilota il succedersi delle configurazioni neuronali che determinano il comportamento. Il substrato neurologico non è in questo caso una modificazione strutturale delle connessioni sinaptiche, ma la ricircolazione temporanea di rappresentazioni in alcune parti della rete neuronale. La memoria operativa non ha obiettivi mnesici, ma obiettivi appunto operativi. Il suo scopo non è mantenere *dati* a lungo termine, ma consentire un articolato processo comportamentale per ottenere un immediato risultato utile (es. comporre un numero telefonico o eseguire una ricetta alimentare). Il comportamento risultante consiste in una sequenza di azioni che utilizza la retroazione sensoriale contestuale per scandirne la sequenza.

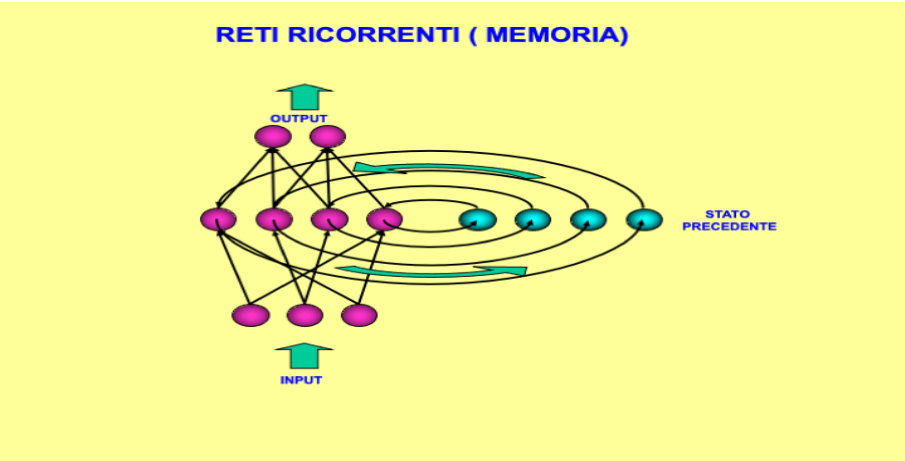


Fig. 50. Rete neurale ricorrente.

Per comprenderne il funzionamento è necessario comprendere il meccanismo delle reti ricorrenti (vedi in seguito): si tratta della persistenza di pattern d'attivazione neuronale tramite connessioni ricorrenti tra neuroni (Fig. 50), lungo le quali i pattern d'attivazione ricircolano (e si modificano) quanto necessario. Una rete dotata di ricorrenze possiede una fugace memoria anche in assenza di modificazioni strutturali (sinaptiche o topologiche). Questo perché in una rete ricorrente, biologica o artificiale, il pattern attuale d'attivazione è determinato, oltre che dall'input attuale proveniente dall'esterno, anche dal pattern precedente della rete stessa e, attraverso questo, da quelli ancora precedenti, sebbene in modo sempre più sfumato via via che ci si allontana nel tempo. È una vera e propria macchina a stati. Ogni stato influenza il successivo, che conterrà una traccia, per quanto codificata e modificata, del precedente: e questo è, di fatto, una memoria dinamica.

Non essendo legata a modificazioni sinaptiche questa memoria rappresenta in effetti un caso, probabilmente l'unico, di memoria senza apprendimento. Il termine più appropriato, utilizzando una terminologia informatica, sarebbe un *buffer.* Insistiamo su questo particolare perché riteniamo che, se non se ne tiene conto, la memoria operativa non può essere correttamente compresa.

L'interfaccia tra immediato passato e immediato futuro, che rappresenta il nostro sé attuale e il nostro presente, la nostra consapevolezza, appare risiedere prevalentemente in questa memoria volatile, che è particolarmente influenzata dalla memoria estesa ambientale. In molte situazioni sperimentali, nelle quali la possibilità di afferenze ambientali viene esclusa o disturbata, si nota che la capienza, l'affidabilità e la precisione di questa memoria volatile sono assai scarse. A questo proposito dobbiamo sottolineare che i segnali che ricircolano lo fanno pur sempre tramite connessioni e sinapsi, le quali necessariamente influenzano ogni stato successivo, per cui esperienze sinapticamente memorizzate del passato possono influenzare il modo in cui pensiamo e agiamo oggi. E, dal canto opposto, ricircolazioni sufficientemente ripetute sono verosimilmente in grado di modificare le stesse sinapsi attraverso cui si trasmettono, e così determinare il trasferimento d'informazioni da questa memoria a brevissimo termine ad una memoria a più lungo termine.

Memoria, retroazioni e ricorrenze

Qualunque rete neuronale che reagisce all'ambiente nel quale è immersa è sottoposta ad una retroazione, poiché parte degli effetti delle sue azioni ritorna successivamente alla rete e di conseguenza può modificarne lo stato di attivazione, in un circolo potenzialmente senza fine. Questa retroazione esterna costituisce una memoria dinamica del comportamento appena eseguito. Quando nella rete compaiono connessioni rientranti, cosicché l'attivazione di alcuni neuroni si riverbera indietro sugli stessi neuroni, direttamente o attraverso altri neuroni interposti, si configura un circuito ricorrente, che di fatto costituisce una retroazione interna alla rete, che può essere di segno positivo o negativo e quindi può esaltare l'attivazione o inibirla secondo il suo stato precedente. La presenza di retroazioni, esterne o interne alla rete, lega lo stato d'attivazione della rete in ciascun dato momento agli stati precedenti: con l'intermediazione dell'ambiente nel caso delle retroazioni esterne, o indipendentemente dall'ambiente nel caso delle ricorrenze interne. In entrambi i casi lo stato della rete viene ad essere influenzato dalla sua storia precedente, e questo costituisce una memoria fenotipica, poiché anche reti strutturalmente identiche produrranno risposte diverse in funzione delle loro storie

individuali. Negli animali dotati di encefalo, e tanto più quanto più si sale nella scala evolutiva, le ricorrenze interne alla corteccia, e tra corteccia e strutture sottocorticali, sono talmente diffuse e ubiquitarie che potremmo dire che tutto l'encefalo è un insieme di circuiti ricorrenti.

Apprendimento

Abbiamo già detto che il processo che determina le modificazioni sinaptiche che permettono la memoria è quel che viene chiamato *apprendimento*. Le modificazioni sinaptiche realizzate dall'apprendimento costituiscono la memoria. I pattern di attivazioni neuronali che si formano attraverso le sinapsi così modificate rappresentano ricordi, o comportamenti *appresi* quando si manifestano all'esterno tramite gli effettori di cui la rete è dotata.

Questa visione propone una corrispondenza tra modificazioni sinaptiche e memoria, e questo è sicuramente vero, ma non è esaustivo. Innanzitutto va considerato che questa descrizione si riferisce essenzialmente alla memoria fenotipica. La memoria genetica non necessita di estensivi rimaneggiamenti della rete (unità, connessioni, sinapsi) a livello individuale, essendo il numero e i collegamenti delle unità, la forza e il ruolo delle connessioni, già stati identificati e ottimizzati dall'evoluzione, che ha selezionato le configurazioni adatte al compito. In secondo luogo, la memoria genetica e quella fenotipica non sono rigidamente compartimentate, ma interagiscono in molti modi. Si pensi, ad esempio, che anche sistemi che a prima vista possono sembrare del tutto geneticamente determinati, quali quelli che consentono la stazione eretta e la deambulazione, devono invece necessariamente sottostare ad un parziale apprendimento fenotipico, perché la memoria genetica non può "sapere" a priori in quale corpo la rete neuronale si verrà a trovare: potrebbe trattarsi di un corpo grosso e pesante, o leggero e flessibile, alto o basso, con arti lunghi o corti, potrebbe nutrirsi bene e godere di muscoli solidi e forti, o trovarsi in condizioni di malnutrizione o malattia e reggersi a malapena. E queste condizioni possono mutare nell'arco della vita. È quindi necessario un apprendimento fenotipico continuo per adattare la base genetica alla specifica realtà individuale.

D'altro canto, come l'apprendimento fenotipico può modificare la memoria genetica (effetto Baldwin), così quest'ultima influenza il primo, in diversi modi. Tanto per citare i principali, si pensi che sono determinati geneticamente sia i meccanismi biochimici che attuano le modificazioni sinaptiche fenotipiche (la capacità d'imparare è trasmessa geneticamente ed espressa fenotipicamente), sia le caratteristiche iniziali della rete. Ed a sua volta l'apprendimento fenotipico influenzerà l'adattamento delle reti, e quindi la loro efficacia nel gioco della vita, condizionando la selezione naturale e quindi la memoria genotipica. Questa mutua interazione tra apprendimento genotipico e apprendimento fenotipico è sinteticamente inquadrabile come segue.

L'apprendimento genotipico fornisce a quello fenotipico un insieme iniziale di unità e connessioni, un *repertorio*, già parzialmente ottimizzato per un corpo tipico (una media) della specie e per l'ambiente esterno con cui probabilmente la rete neuronale si troverà ad avere a che fare (in base all'esperienza evolutiva di quella specie). L'apprendimento fenotipico opera poi eliminando parti e rinforzandone altre di questo repertorio iniziale, secondo l'effettiva realtà del proprio corpo e dell'ambiente in cui si viene a trovare. Questa visione è nota come *darwinismo neurale* (G.M. Edelman, 1987).

23. EMOZIONI E SENTIMENTI

Negli ultimi 60 anni gli studi neurologici sul comportamento sono stati prevalentemente orientati agli aspetti cognitivi, utilizzando tutte le tecniche biochimiche e radiologiche che divenivano progressivamente possibili, ma trascurando forse eccessivamente il comportamento emotivo, che solo recentemente inizia ad essere rivalutato (Panksepp, Ledoux).

Fig. 51. Repertorio comportamentale del rospo maschio

I meccanismi evolutivi, come ampiamente abbiamo descritto, hanno progressivamente selezionato le forme e i comportamenti più adatti all'ambiente nel quale ogni singola specie si viene a trovare, per la propria riproduzione. I primi meccanismi comparsi per la sopravvivenza sono stati i riflessi locali elementari congeniti di evitamento al danno. Successivamente, in animali con sistema nervoso progressivamente più evoluto, questi riflessi elementari si sono organizzati in *risposte riflesse*

multisistemiche, vegetative e motorie, congenite ma modificabili dalle esperienze (riflessi condizionati), che sono state definite *emozioni*. Le emozioni sono la struttura portante del comportamento animale e il comportamento cognitivo poggia consistentemente sul comportamento emotivo, che nelle specie più evolute (mammiferi sociali) definisce anche la personalità del singolo individuo. È un sistema che entra automaticamente in azione quando innescato dalla percezione di particolari situazioni ambientali, riconosciute in parte geneticamente in parte fenotipicamente, per fronteggiare condizioni critiche per la sopravvivenza o la riproduzione. In modo molto riduttivo queste risposte si manifestano con comportamenti di allontanamento o avvicinamento allo stimolo/situazione percepito, e, in encefali evoluti, con *sentimenti* (percezione dell'*effetto* attrattivo o repulsivo delle emozioni che producono una percezione consapevole di *piacere/dispiacere* sulla propria persona con varie sfumature).

In Fig. 51 sono riportate le risposte fondamentali del rospo maschio di fronte a qualcosa che si muove vicino a lui. Si noti l'efficienza di una tale soluzione, che con appena tre risposte standardizzate risolve efficacemente la maggior parte delle situazioni rilevanti per la sopravvivenza e riproduzione che l'animale può incontrare.

Sebbene molte femmine umane possano ritenere i comportamenti fondamentali del maschio umano non sostanzialmente dissimili da quelli del rospo, in effetti con l'aumentare della complessità del sistema nervoso aumenta anche il numero e la complessità delle risposte comportamentali impresse dall'evoluzione nel DNA. Nell'Uomo queste costituiscono le *emozioni fondamentali* o *emozioni di base*, presenti in tutti gli individui a prescindere dalla cultura-società in cui vivono e dalla loro storia individuale. Qui tratteremo esclusivamente queste e non le cosiddette *emozioni secondarie*, apprese nel corso della vita dell'individuo per esperienza e per condizionamento sociale, come la vergogna e il rimorso.

Basi neuroanatomiche, neurofisiologiche e neuropsicologiche

Le risposte riflesse più elementari, i riflessi monosinaptici come la rapida retrazione di un arto sottoposto a stimolo doloroso, sono generate a livello del midollo e della sua espansione endocranica, il troncoencefalo. Le risposte riflesse emotive (da *e-movere,* muovere fuori - manifestare, il movimento è importante) sono generate da strutture paleoencefaliche, comparse evolutivamente molto prima della corteccia prefrontale. Le più profonde di queste strutture sono collocate nel mesencefalo, subito sopra il troncoencefalo, nella cosiddetta *sostanza grigia periacqueduttale*. Il troncoencefalo è il primo livello a raccogliere le sensibilità somatiche da tutto il corpo; nel mesencefalo a queste si uniscono anche le sensibilità visiva e uditiva e olfattiva. Il mesencefalo è quindi il primo livello a integrare le sensibilità dal corpo e quelle dal mondo esterno, ed è proprio a questo livello che si generano le emozioni.

Le risposte emotive nate nel mesencefalo sono ulteriormente elaborate dalle altre strutture paleoencefaliche (cfr. Cap. 19 *Livelli funzionali gerarchici*), che utilizzano anche le capacità di memoria e apprendimento della corteccia per associare ad ogni stimolo-situazione significativo esperito nella vita la risposta emotiva appropriata. Questo apprendimento emotivo si attua essenzialmente tramite condizionamento, e per esso sembra particolarmente importante la struttura paleoencefalica

amigdala, laddove per l'apprendimento cognitivo sembra invece particolarmente importante la struttura *ippocampo*. Ledoux nel suo libro *Il Cervello Emotivo* propone uno schema semplificato delle strutture encefaliche coinvolte nella risposta emotiva, con una via bassa che prevede l'attivazione dell'amigdala direttamente dal talamo, molto rapida ed essenziale e che utilizza prevalentemente riflessi innati, ed una via alta, più lenta e accurata, che coinvolge anche le strutture corticali sensoriali e utilizza anche memorie fenotipiche.

La corteccia prefrontale ha sulle risposte emotive prevalentemente un'attività inibitoria, come del resto ha su quasi tutte le azioni riflesse. Le strutture sottocorticali agiscono efficacemente nel contesto attuale, con comportamenti che possiamo definire *impulsivi.* Le strutture corticali modulano i comportamenti impulsivi utilizzando memorie e previsioni, trasformandoli in comportamenti *intenzionali*. A farla breve potremmo dire che la corteccia prefrontale agisce per il futuro e il paleoencefalo per il presente; o, più drasticamente, che la corteccia prefrontale spesso spegne quello che il paleoencefalo accende.

Classicamente le risposte emotive producono *effetti comportamentali* ed *effetti vegetativi*. A questi riteniamo di dover aggiungere anche *effetti neuronali*, che si producono e si manifestano internamente all'encefalo. Gli effetti comportamentali hanno manifestazioni *pubbliche*, percepibili anche dagli osservatori; gli effetti vegetativi hanno manifestazioni prevalentemente *private*, percepite solo dal soggetto che produce l'emozione, ma anche alcune *pubbliche* (rossore, lacrimazione, piloerezione); gli effetti neuronali hanno solo manifestazioni *private.*

1. Effetti comportamentali: attivazione di muscoli somatici che danno luogo ad azioni e comportamenti, con associate manifestazioni pubbliche mimiche e fonetiche che hanno lo scopo di manifestare l'emozione (aggressività, pericolo, attrazione ecc.) agli altri.

2. Effetti vegetativi: attivazione di muscoli vegetativi e ghiandole che danno luogo a risposte specifiche, come il vomito per espellere ingeriti disgustosi o tossici, e/o a modificazioni vegetative di supporto, come la *risposta simpatica* o *reazione d'allarme* (aumento della frequenza cardiaca, del respiro e della pressione arteriosa, blocco della peristalsi e della minzione, e altro, a supporto dell'attività motoria); o viceversa la *risposta parasimpatica* (riduzione della frequenza cardiaca, del respiro e della pressione arteriosa, aumento della peristalsi e della minzione, e altro, di supporto al riposo e alla digestione), due schemi di risposta efficacemente sintetizzati nelle locuzioni inglesi *fly or fight* (scappa o combatti) e *rest and digest* (riposa e digerisci).

3. Effetti neuronali: rinforzo dei comportamenti a cui consegue benessere ed indebolimento di quelli a cui consegue malessere. Aumento della vigilanza e dell'attenzione nella reazione d'allarme, o viceversa riduzione della vigilanza e dell'attenzione e tendenza all'assopimento nell'attivazione parasimpatica. Questo effetto, del tutto trascurato nella letteratura corrente proprio perché nascosto e difficilmente modificabile, è quello forse più importante per alcune emozioni (piacere e dispiacere) che determinano modulazione o modificazione del comportamento a seguito dell'esperienza individuale. Fra gli effetti neuronali potremmo anche includere l'arrivo dell'emozione alla coscienza, ovvero il *sentimento*: v. in seguito.

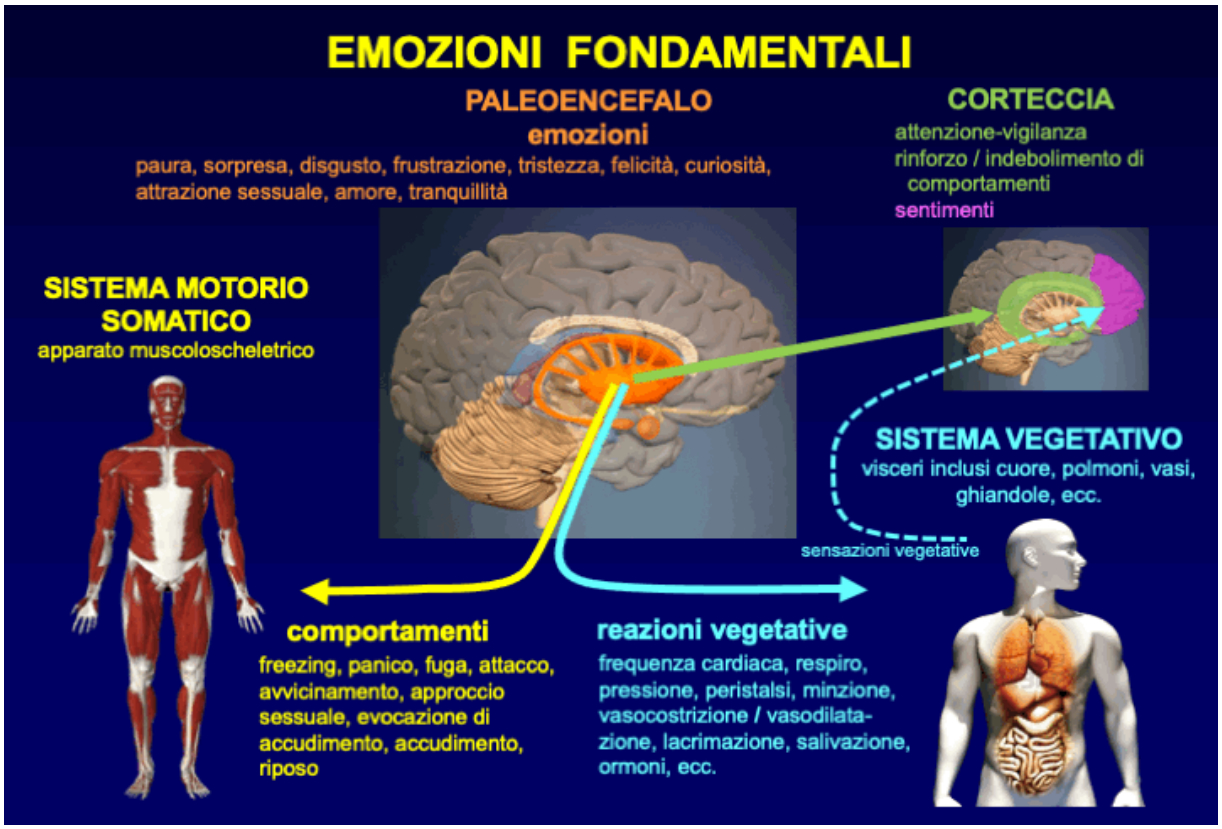


Fig. 52. Effetti somatici (in giallo), vegetativi (in azzurro) e neuronali (in porpora quelli sulle aree prefrontali, in verde gli altri) delle emozioni nell'uomo.

Le tre categorie di effetti sopra elencate corrispondono a tre sistemi anatomici che le realizzano (Fig. 52):

1. Gli effetti comportamentali si realizzano attraverso il sistema motorio somatico (strutture e vie motorie centrali, nervi e muscoli). Le strutture e le vie motorie centrali coinvolte sono essenzialmente quelle del sistema extrapiramidale (i comportamenti emotivi fondamentali non includono manipolazione fine e verbalizzazione, funzioni tipiche del sistema piramidale). Grida, ringhi, lamenti, singhiozzi e simili sono fonazioni e vocalizzazioni, non verbalizzazioni richiedenti il coinvolgimento dell'area di Broca e dei suoi neuroni piramidali; ed infatti si manifestano anche negli animali privi di tale area.

2. Gli effetti vegetativi si realizzano attraverso il sistema motorio vegetativo con le sue due componenti simpatica e parasimpatica, e attraverso il sistema endocrino sottoposto al sistema ipotalamo-ipofisi, in particolare l'asse ipotalamo-ipofisi-surrene.

3. Gli effetti neuronali si realizzano attraverso vie e centri esclusivamente interni al sistema nervoso stesso, costituenti il *sistema limbico* (Fig. 53) e la *corteccia emotiva* (Fig. 54), e attraverso le vie sensoriali del sistema nervoso autonomo che riportano al cervello informazioni sugli effetti vegetativi.

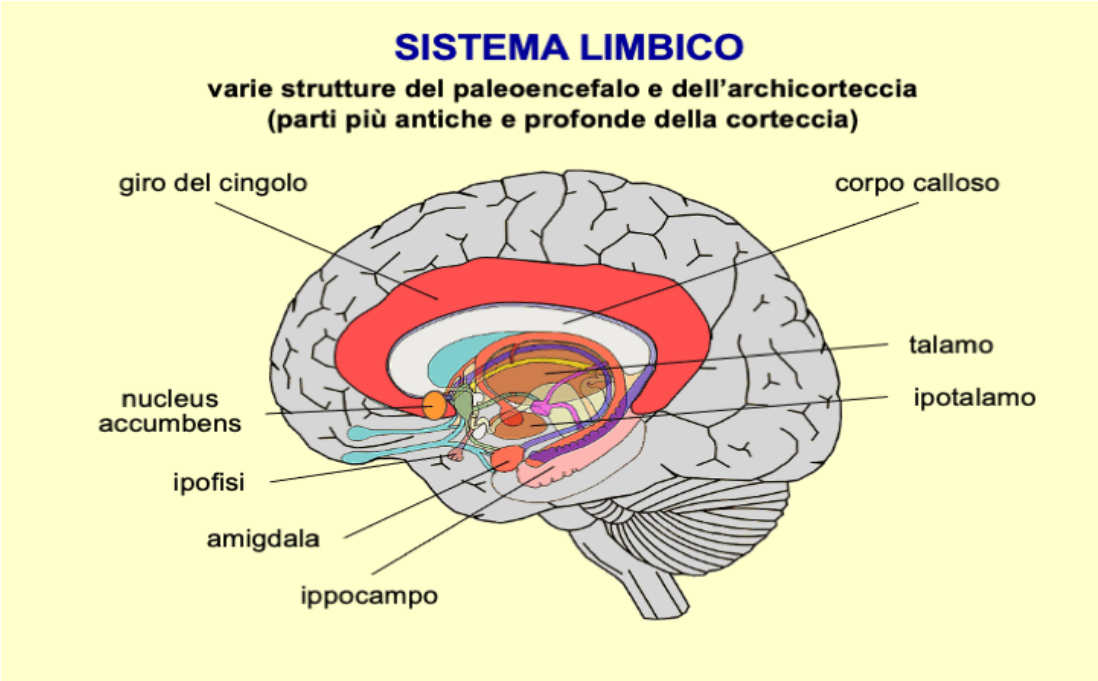


Fig. 53. Sistema limbico. Indicate solo alcune strutture menzionate nel testo.

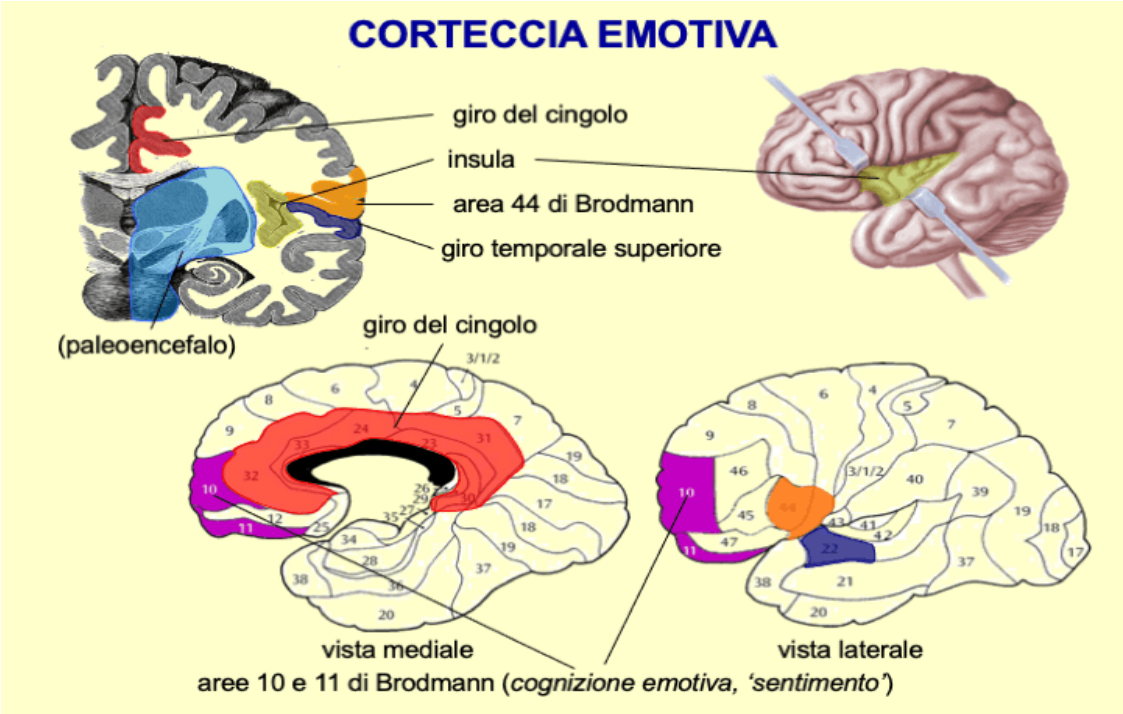


Fig. 54. Aree della *corteccia emotiva*. Il paleoencefalo (in azzurro) e le aree 10 e 11 di Brodmann (prefrontali, in viola) non ne fanno parte, ma sono rappresentate in quanto utili alla comprensione del processo complessivo, il paleoencefalo generando le *emozioni* e le aree 10 e 11 generando i *sentimenti*. Notare i rapporti di vicinanza del paleoencefalo con il giro del cingolo e l'insula.

Le aree prefrontali, ossia la coscienza, percepiscono l'emozione attraverso le vie neuronali interne all'encefalo e attraverso i cambiamenti vegetativi e somatici che fanno parte della risposta emotiva (batticuore, fame d'aria, rossore, erezione dei peli o dei capelli, sudorazione fredda, pianto, tremori, battito dei denti, tensione muscolare, ecc.). Nel linguaggio comune il termine *emozione* non distingue fra la risposta emotiva nel suo complesso e la parte di essa che arriva alla coscienza, anzi quando si parla di emozione ci si riferisce abitualmente a quest'ultima; ma in linguaggio psicologico più preciso il termine per questa parte è *sentimento*: sentimento di paura, sentimento di rabbia, ecc. Questo come abbiamo detto è solo una parte della risposta emotiva, e neanche la più importante, accanto alle altre componenti costituite dalle risposte vegetative (includenti anche le risposte endocrine ed esocrine) e dalle risposte motorie-comportamentali. Si può dire che sentiamo paura perché ci batte forte il cuore, e non viceversa (W. James 1884). La parte non cosciente è la più importante, perché costituisce un *autopilota* molto efficace, che forse rappresenta più del 90% del nostro comportamento e per alcune specie il 100%.

Perché allora l'evoluzione ha prodotto il *sentimento* dell'emozione? Quale è il vantaggio conservativo/riproduttivo che questa funzione cognitiva aggiunge? Abbiamo detto nel capitolo "consapevolezza" che la spinta evolutiva verso la consapevolezza dell'emozione è l'estensione dell'apprendimento automatico (tripletta) del nesso causale tra la **causa** dell'emozione e gli **effetti** sulla propria persona che consente una personale modulazione intenzionale del comportamento.
Es. il *sentimento di paura* del fuoco viene accentuato se le condizioni dell'incendio sono valutate come molto pericolose e invece scompare se sto cuocendo una bistecca sulla brace. Ma non solo il sentimento è diverso, anche le manifestazioni motorie, vegetative e neurologiche proprie dell'emozione vengono modificate. Insomma il ***sentimento*** consente di **modulare e modificare gli aspetti comportamentali dell'emozione** producendo scelte consapevoli con evidenti vantaggi ed è per questo che è comparso nell'evoluzione dell'encefalo. E, come si è detto, il sentimento è probabilmente il primo aspetto consapevole dell'effetto su di sé della percezione della *realtà contestuale*. Quando comparirà evolutivamente la capacità di immaginare percezioni non contestuali, e successivamente anche una loro rappresentazione simbolica trasmissibile, la consapevolezza raggiungerà il livello che caratterizza le specie più evolute.

Le emozioni in psicologia

Vi è dibattito fra gli studiosi su quante e quali siano le emozioni fondamentali. Fino a tempi recenti la ricerca si è basata essenzialmente sulla ricerca degli schemi di reazione comuni a tutte le popolazioni di H. Sapiens indipendentemente dall'apprendimento culturale. Più recentemente Panksepp e Biven hanno invece studiato gli effetti della stimolazione di strutture nervose emotive in animali (impossibile nell'Uomo per ragioni etiche) con la sostenibile assunzione che trattasi di reazioni e strutture nervose evolutivamente antiche, che l'Uomo condivide largamente almeno con gli altri mammiferi, identificando sette emozioni di base: Ricerca (Seeking); Paura (Fear); Rabbia (Rage), Desiderio Sessuale (Lust); Prendersi Cura (Care); Sofferenza (Grief); Giocosità (Play). Nell'elenco non è incluso il disgusto, che Panksepp qualifica come *affetto sensoriale*, appena un gradino più su degli *affetti omeostatici* fame, sete, bisogno di urinare e di defecare, nonostante sia considerato emozione dalla maggior parte degli

altri Autori: si tratta evidentemente del solito problema che "la Natura non fa salti", e dove mettere il limite fra una categoria e l'altra è una questione soggettiva.

Per quanto ci riguarda concordiamo ampiamente con la lista di Panksepp – con la naturale riserva che il peso e l'importanza di ciascuna emozione possono variare significativamente da specie a specie – e notiamo con soddisfazione l'importanza della *Ricerca* e del *Desiderio Sessuale*, da noi già elencati fra le emozioni fondamentali (con il nome *Curiosità* per la Ricerca) in una precedente edizione di questo libro, anche se trascurate nelle liste tradizionali. Da parte nostra continuiamo ad includere fra le emozioni fondamentali anche la *Felicità,* la *Tranquillità*, il *Disgusto* e la *Sorpresa,* pur non incluse nella lista di Panksepp. È pensabile che la "nostra" *Felicità* abbia alcuni punti in comune con la *Giocosità* di Panksepp, insieme a varie differenze almeno in parte attribuibili alle differenze fra le specie. Riteniamo anche che la *Sofferenza* e il *Prendersi Cura* siano strettamente correlate (discussione in seguito).

	Emozione		**Comportamento/i**	**Sentimento**
1	Seeking	Ricerca	Esplorazione	Curiosità
2	Fear	Paura	Freezing, fuga, panico	Paura
3	Rage	Rabbia	Aggressione	Rabbia
4	Lust	Desiderio sessuale	Avvicinamento, approccio	Eccitamento (sessuale)
5	Care	Prendersi cura	Accudimento	Affetto, amore
6	Grief	Sofferenza	Pianto	Tristezza
7	Play	Giocosità	Gioco	Eccitamento (allegria)
8		Felicità	Espressioni, vocalizzazioni	Gioia
9		Tranquillità	Rilassamento, sonno	Serenità
10		Disgusto	Allontanamento, vomito	Disgusto
11		Sorpresa	Freezing	Stupore

Tab. 1. Emozioni fondamentali e corrispondenti comportamenti e sentimenti.

Nella Tabella 1 riassumiamo la nostra lista delle emozioni fondamentali e dei comportamenti e sentimenti ad esse associati. Le prime sette coincidono sostanzialmente con le emozioni di Panksepp. Nella Fig. 55 riproponiamo la stessa lista, evidenziando in bianco quelle su cui sostanzialmente concordiamo con Panksepp; in arancio quelle su cui concordiamo con altri autori; e in azzurro quella (la *Tranquillità*) che non troviamo considerata da alcun altro autore, ma che a nostro avviso merita d'essere inclusa. Precisiamo che i comportamenti elencati sono da intendersi in senso lato: ad es. il comportamento *fuga* include anche i comportamenti elementari di espulsione-allontanamento come il vomito; il comportamento *attacco* include anche il comportamento minaccioso, senza arrivare all'effettivo scontro fisico; *l'approccio sessuale* include anche l'esibizione ed il corteggiamento, senza arrivare necessariamente all'accoppiamento. Almeno negli animali sociali le manifestazioni pubbliche dell'emozione (postura, mimica e azioni) costituiscono di fatto, come abbiamo detto, anche messaggi che, oltre ad essere indirizzati all'eventuale minaccia o al partner sessuale, possono essere utili ad altri. Nessuno può sapere se animali con il solo livello evolutivo paleoencefalico (pesci, anfibi e rettili) sentano le emozioni che esprimono, ma è pensabile che la modalità comportamentale pubblica sia vantaggiosa per la conservazione della specie, comunicazione codificata di un'esperienza sensoriale

utile per gli altri, e per questo non sembra necessaria un'esperienza cosciente. Ne consegue che se avviene questo tipo di comunicazione simbolica l'individuo trasmittente può esserne del tutto inconsapevole, ma l'organismo ricevente deve essere equipaggiato per decodificare il segnale emotivo, e quindi il suo sistema nervoso deve poter decodificare tali simboli, anche egli in modo del tutto inconsapevole. Più evolve il sistema nervoso più evolve la comunicazione simbolica: non a caso rettili e pesci non hanno mimica facciale, mentre i mammiferi sì, ed alcuni di questi parlano anche.

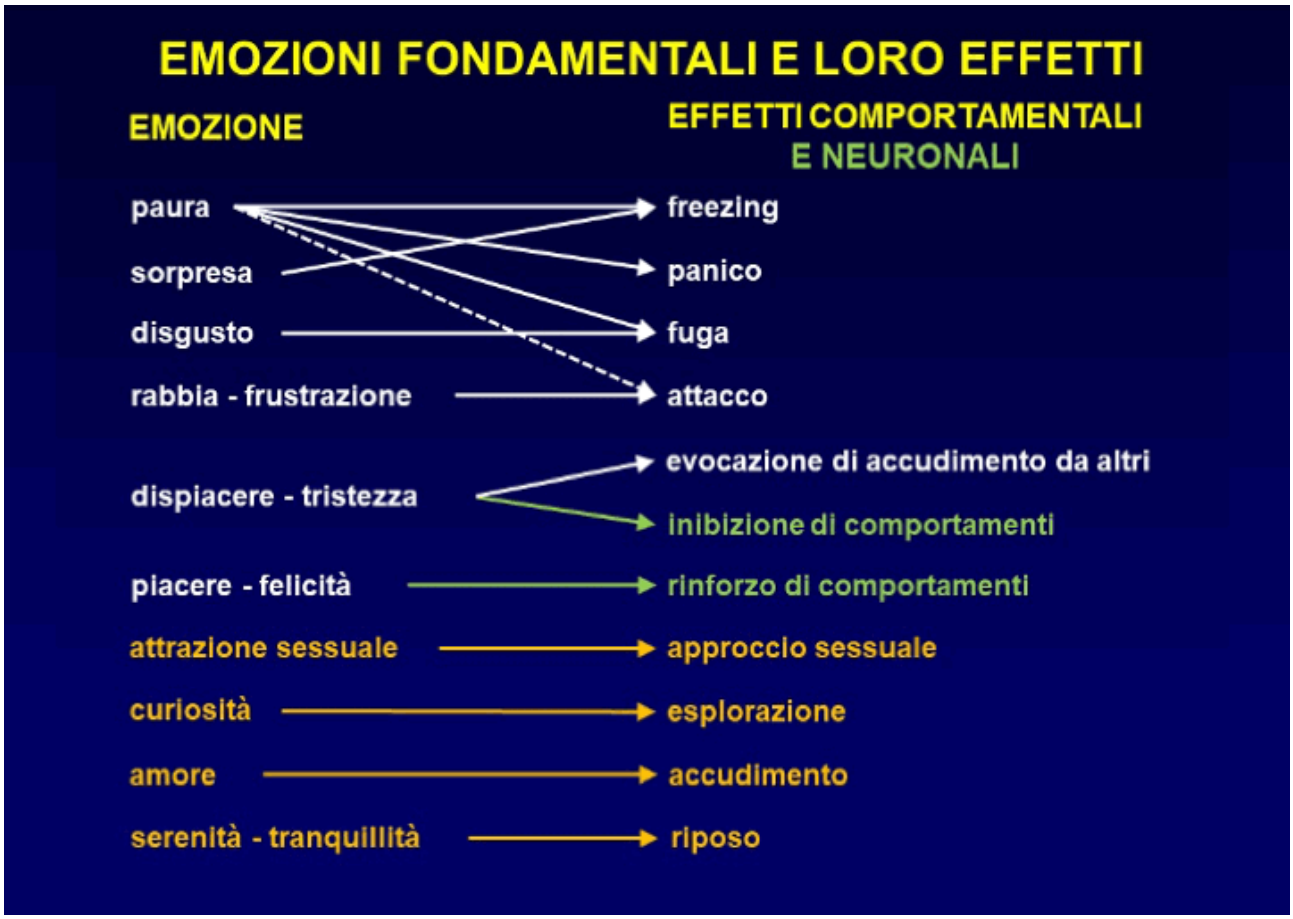


Fig. 55. Le emozioni fondamentali nell'uomo. In bianco le emozioni già riconosciute. In arancio quelle che riteniamo dovrebbero essere riconosciute. In verde gli effetti neuronali, altrove generalmente non considerati.

Riassumendo, **l'emozione è un riflesso multimodale congenito** che ci accomuna a tutti gli animali che hanno sviluppato un sistema nervoso sufficientemente evoluto (paleoencefalo).

L'attivazione sensoriale principale che innesca le emozioni è l'olfatto che è il primo sensore comparso in animali ancora molto semplici che fornisce informazioni dell'ambiente, ma che ha enorme importanza anche negli umani anche se non ce ne rendiamo conto (ferormoni). Tutti sappiamo le

capacità che un particolare odore ha di evocare un ricordo individuale ma trascuriamo gli effetti che alcune molecole odorose hanno sul nostro comportamento che invece i fabbricanti di profumi ed essenze conoscono bene e utilizzano proficuamente.

Il compito di questo riflesso è preservare la sopravvivenza con finalità riproduttive. Negli animali più evoluti compare, sempre in modo automatico, la possibilità di modificare e modulare in parte l'espressione di questo riflesso in funzione delle esperienze personali, che per questo è assimilabile ad un riflesso condizionato, e di percepire emozioni trasmesse automaticamente con il comportamento da consimili. In encefali molto evoluti, che hanno sviluppato cortecce associative consistenti e cortecce direttive prefrontali, compare anche consapevolezza delle emozioni, il *sentimento.* Il raggiungimento di questo livello consente modificazioni assai più rilevanti almeno del comportamento pubblico emotivo e la comparsa delle *emozioni secondarie*.

Modulazione fenotipica delle emozioni

L'apprendimento fenotipico può modulare le emozioni in vari modi:

Inibizione volontaria dei comportamenti innati

Gli umani, soprattutto adulti, raggiungono generalmente una certa capacità d'inibire volontariamente (talora anche automaticamente) gli effetti delle emozioni attraverso il *sentimento.* Ad esempio non retraggo il braccio in caso di prelievo di sangue, perché so che è nel mio interesse; non aggredisco automaticamente chi mi suscita rabbia, perché so che potrei esserne punito (dall'aggredito, dai suoi familiari o amici, o dallo Stato); non piango in reazione a un dolore, perché mi hanno detto che *gli adulti non piangono*, e se lo facessi sarei considerato un bambino. Questa inibizione può essere piuttosto efficace per gli effetti comportamentali motori (segmentali); meno per quelli mimici; ancora meno per quelli vegetativi; poco o nulla per quelli neuronali.

Aggiunta di nuovi stimoli emotigeni in base alle esperienze

Nel paleoencefalo esistono associazioni geneticamente predeterminate tra alcuni stimoli generici e le appropriate emozioni: ad esempio la paura è istintivamente evocata da forti rumori (pericolo di terremoto, frana, crollo), forme in movimento vicino a noi (pericolo di predatore), esseri striscianti (pericolo di serpente velenoso), insetti (pericolo di veleno, puntura), od oggetti puntuti (pericolo di ferimento). L'avventura fenotipica aggiunge a questi limitati repertori innati le numerose esperienze individuali con l'implementazione di riflessi condizionati. Se un piccolo insetto che non ho mai visto prima mi punge dolorosamente, il mio sistema nervoso crea all'istante un'associazione fra quell'insetto e l'emozione paura, così che in futuro la sua vista mi susciterà paura e quindi evitamento. È interessante notare che, diversamente dall'apprendimento cognitivo, in cui un nuovo stimolo viene associato ad una sua

rappresentazione mentale cognitiva tramite esposizioni ripetute allo stimolo, per l'apprendimento emotivo è di solito sufficiente anche una singola esposizione.

Adattamento del comportamento innato al contesto del momento

Il comportamento innato potrebbe essere semplicemente *fuga*, ma la scelta del comportamento realmente effettuato *fuga su un albero* o *fuga dentro un nascondiglio* è fatta in base alle circostanze contestuali percepite

Selezione o modifica del comportamento innato sulla base della propria costituzione fenotipica o di abilità acquisite

Di fronte ad un avversario la risposta di fuga o di attacco, oltre che dall'aggressività e struttura somatica del nemico (contesto), dipende anche dalla consapevolezza della propria struttura fisica e cognitiva (addestramento).

Differenze rispetto alle trattazioni comuni

A conclusione del capitolo forniamo maggiori dettagli sulla ragion d'essere, a nostro avviso, di due emozioni davvero fondamentali quali la *Felicità* e la *Sofferenza*, ed esplicitiamo le nostre motivazioni per includere tra le emozioni fondamentali certe emozioni invece non classicamente incluse, o non da tutti, e per escluderne almeno una, il *disprezzo*, invece spesso inclusa. Questa discussione potrebbe essere d'interesse per chi, già dotato di preparazione nell'argomento, possa nutrire perplessità rispetto ad alcune voci dell'elenco in Fig. 55. Gli altri potrebbero trovare comunque qualche ulteriore chiarificazione su quanto fin qui descritto.

Felicità e Sofferenza

Queste due emozioni sono generalmente incluse fra le emozioni fondamentali, con vari nomi per la Sofferenza, quali Tristezza o Dolore. Tuttavia troviamo stranamente trascurati i loro effetti ed il loro scopo. Non possiamo accontentarci d'interpretazioni come ad esempio, per la Sofferenza-Tristezza, "dare il giusto spazio al dolore, affinché non continui a fare male". Troppo elaborato, troppo cognitivo, le emozioni sono molto più basiche. Dobbiamo piuttosto chiederci: Felicità e Sofferenza come servono alla sopravvivenza e alla riproduzione? Una volta riformulata la domanda in questo modo le risposte emergono spontaneamente.

A nostro avviso è stata finora data una sola interpretazione corretta di queste emozioni, anzi solo dell'espressione mimica della Sofferenza-Tristezza: l'interpretazione di John Bowlby del pianto, che interpreta la tristezza come un'emozione *sociale*, le cui manifestazioni mimiche servono ad evocare accudimento da parte di altri, in primo luogo le cure parentali dai genitori. Sarebbe quindi questa un'emozione che induce una risposta comportamentale (anch'essa innata) in altri individui, evocando in essi l'emozione *Cura* ed il comportamento correlato *Accudimento.*

Concordiamo con questa tesi, ma proponiamo che altri effetti principali di queste due emozioni siano i loro *effetti neuronali*, ignorati nelle descrizioni psicologiche classiche, ovvero per la Felicità il rinforzo del comportamento che l'ha prodotta, e per la Tristezza l'indebolimento-inibizione del comportamento che l'ha prodotta. È noto almeno un circuito neurologico che sembra preposto a queste funzioni: il cosiddetto *circuito della ricompensa*, coinvolgente il *nucleus accumbens*, il *nucleo arcuato dell'ipotalamo*, e vie endorfinergiche e dopaminergiche non ancora del tutto chiarite nei loro dettagli e meccanismi. Allo stato attuale delle conoscenze questo circuito sembra includere sia componenti che si attivano in condizioni di successo-benessere-felicità, sia componenti che si attivano in condizioni di stress-infelicità, per cui potrebbe validamente mediare ambedue gli effetti: rinforzo dei comportamenti che danno esito favorevole ed indebolimento di quelli che danno esito sfavorevole. Con ovvie implicazioni nelle tossicodipendenze.

Desiderio sessuale

Sbalorditivamente, prima di Panksepp nessuna delle elencazioni classiche includeva fra le emozioni fondamentali il Desiderio sessuale. Nella precedente edizione di questo libro abbiamo contestato la sua esclusione, ipotizzando che fosse stato considerato un bisogno fisiologico al pari della fame e della sete (uno di quelli che Panksepp chiama *affetti omeostatici*) e sottolineando come si associ a modificazioni fisiologiche vegetative (dilatazione della rima palpebrale e delle pupille, aumento del ritmo cardiaco e respiratorio, rossore cutaneo, inturgidimento del pene o del clitoride, secrezione dalle ghiandole del Bartolini), neuronali (aumento della vigilanza, aumento e concentrazione dell'attenzione sull'oggetto del desiderio), mimiche e comportamentali del tutto comparabili, se non superiori, a quelle associate ad altre emozioni. Le ricerche di Panksepp hanno qualificato il Desiderio sessuale come emozione ed assumiamo ciò a conferma di quanto da noi già sostenuto.

Ricerca

Altra emozione, più comunemente denominata *curiosità*, che faticava ad essere inclusa fra le emozioni fondamentali e che abbiamo difeso nella precedente edizione, finalmente obiettivata dal lavoro di Panksepp. In questa edizione ci allineiamo con lui nel denominarla Ricerca e riserviamo il termine *curiosità* al suo sentimento ed il termine *esplorazione* al relativo *comportamento*. Teniamo a precisare che riteniamo questa emozione essere molto primitiva e presente in moltissime specie anche evolutivamente molto semplici, poiché spinge all'apprendimento di nessi causali (causa -effetto), che, come abbiamo già detto, costituisce forse la più importante spinta evolutiva verso organismi progressivamente più complessi in grado di interagire sempre più efficacemente con l'ambiente, migliorando le probabilità di sopravvivenza e riproduzione.

"Perché": questa parola, che compare anche nel titolo di questo libro, sintetizza appunto la ricerca di nessi causali nei fatti e fenomeni percepiti. L'evoluzione ciecamente ed automaticamente seleziona gli individui di ogni specie che casualmente con strutture e comportamenti mostrano soluzioni a queste domande. Negli animali più evoluti i riflessi condizionati consentono l'apprendimento individuale automatico di questi nessi causali e nell'uomo oltre a questi riflessi anche la cultura consente l'apprendimento indiretto dalle esperienze di altri con imitazione e insegnamento. Ma l'insegnamento oltre a fornire spiegazioni preconfezionate dovrebbe fornire mezzi per trovarle individualmente, ed è

quello che è avvenuto finora, le nozioni acquisite possono essere utilizzate per rispondere a nuovi *perché*. La metodologia scientifica (ipotesi, sperimentazione, verifica) ne è la formalizzazione più efficace. Ma oggi un dubbio si affaccia; attraverso le AI la soluzione a quasi tutte le risposte che vengono poste è alla portata di chiunque e lo sforzo di cercarle individualmente svanisce progressivamente, abbiamo già detto che ciò che non serve e "costa" evolutivamente viene eliminato, che ne sarà delle nostre cortecce prefrontali?

L'invenzione della causa**,** quando quella reale non si trova, è probabilmente dovuta alla pressione evolutiva che premia individui che manifestano il comportamento di *curiosità*. Queste invenzioni hanno un aspetto positivo se sono temporanee in attesa di spiegazioni più aderenti alla realtà, come nel progresso scientifico dove possono prendere il nome di *ipotesi*, ma in altri contesti, ove rimangono permanenti, spiegano il comportamento fideistico religioso e superstizioso. Può far sorridere il comportamento di chi, evitando di passare sotto una scala e non riportando conseguenze nei pochi minuti successivi, attribuisca all'*evitamento* della scala la *causa* della propria incolumità. Ma se analizziamo minuziosamente il comportamento di ognuno di noi è possibile trovare tracce, si spera minime, di questo atteggiamento superstizioso. Quest'ultimo è presente anche in animali molto meno evoluti, come nei piccioni, che si può notare nell'apprendimento di riflessi condizionati, dove spesso essi associano eventi occasionali allo stimolo che innesca l'azione per la ricompensa, come l'aver fatto per caso due giri in tondo *prima* di beccare la leva che scarica il cibo e che dopo vengono regolarmente eseguiti prima di ogni pressione. Il comportamento superstizioso è difficile che si estingua perché paradossalmente è rinforzato dal "premio", erogato indipendentemente da questo. E permane anche perché, in molti casi, è meglio l'invenzione di una causa non vera che l'incertezza ansiogena! Come abbiamo detto l'invenzione e la resistenza dei memi "fondamentalisti "è dovuta a questo.

Paura e Ansia

Sono spesso assimilate perché le attivazioni multisistemiche conseguenti sono molto simili ma la differenza è consistente e probabilmente dipende dal fatto che il termine *paura* è identico sia per l'emozione che per il sentimento mentre *ansia* è sicuramente un termine del sentimento. Nel sentimento la differenza dipende dal fatto che la *paura* è conseguente una sensorialità esterna percepita o ricordata, mentre l'*ansia* è conseguente la percezione di uno stato iperattivo interno non tanto dipendente dalla percezione della realtà esterna quanto da immaginazioni /previsioni personali.

Cura

Già nella precedente edizione di questo libro sostenevamo, dal comportamento di molti animali, soprattutto uccelli e mammiferi, uomo incluso, di dover includere fra le emozioni fondamentali anche l'Amore, con il relativo comportamento: l'accudimento, a partire dalle cure parentali, che rappresentano sicuramente un comportamento assolutamente essenziale collegato alla riproduzione. Le ricerche di Panksepp ci portano a considerare l'Amore come l'equivalente umano dell'emozione Cura. Aderiamo a questo termine più generale e meno sentimentalistico.

A differenza dalle altre emozioni, che giustificano la loro comparsa evolutiva per gli effetti autoconservativi sull' individuo, la *Cura* ha effetti protettivi sulla prole, sulla propria specie, sui propri

geni, tanto che questo comportamento riflesso è comparso molti milioni di anni fa su insetti sociali (formiche e api) assai prima della sua comparsa dei mammiferi. Finché questo comportamento rimane solo un riflesso genetico il dispendio energetico del "genitore" fino al proprio sacrificio è superato ampiamente dall'effetto protettivo sulla sempre numerosa prole appena nata, ed è questo ciò che è vagliato dalla selezione naturale. Ma quando in animali con encefali molto più evoluti questo comportamento riflesso è anche in parte modulabile come un riflesso condizionato e quindi è soggetto a inibizioni o accentuazioni in funzione degli effetti su chi lo esprime, come mai permane se non porta vantaggi diretti per il genitore, anzi solo svantaggi, e inoltre la prole da proteggere non è più cosi numerosa? evidentemente un effetto positivo per il genitore deve esserci e probabilmente questo è il SENTIMENTO di "piacere personale" che consegue all'azione di "cura, per altri". Di nuovo la selezione naturale ha "premiato" i genitori che manifestavano questo proprio sentimento di piacere che promuoveva il comportamento "cure parentali". A livello umano il processo culturale ha allargato questo comportamento protettivo su piante e animali d'allevamento, poi ad animali da compagnia e in alcune persone al pianeta intero. Si è dato un nome a questo tipo di *Cura,* si parla di *Altruismo*, ma è sempre la conservazione della specie il motivo per cui questo comportamento esiste, Insomma L'*altruismo* può essere considerato un effetto positivo mascherato dell'*egoismo* dei geni (Dawkins).

Tranquillità

Emozione sorprendentemente omessa da praticamente tutti gli elenchi, nonostante possieda tipiche manifestazioni comportamentali (cessazione dell'attività motoria, rilassamento muscolare, assunzione di posizione clinostatica o seduta), mimiche (rilassamento dei muscoli facciali, salvo eventuale minimo accenno a sorriso, calo della palpebra superiore), vegetative (attivazione parasimpatica: rallentamento della frequenza cardiaca e del respiro, calo della pressione arteriosa, broncospasmo, vasocostrizione muscolare e vasodilatazione intestinale e renale, aumento della peristalsi e della diuresi, ecc.) e neuronali (calo della vigilanza e dell'attenzione, addormentamento). Forse trascurata in quanto, se non si ha presente il quadro d'attivazione parasimpatica, le manifestazioni esterne apparenti sono essenzialmente *negative*, sembrano un'inattivazione piuttosto che un'attivazione.

Giocosità

Anche questo comportamento non è stato considerato un'emozione, se non da Panksepp, ma in realtà dovrebbe esserlo, perché è un comportamento riflesso a specifiche situazioni ambientali, con obiettivo di addestramento alla caccia e alla lotta e, negli animali più evoluti, alla manipolazione oltre che alla socialità.

Disprezzo

Lo escludiamo dalle emozioni fondamentali in quanto emozione non innata, ma chiaramente appresa (basata su condizionamento sociale). Basti considerare una sua descrizione: "sentimento e atteggiamento di totale mancanza di stima e disdegnato rifiuto verso persone o cose, considerate prive di dignità morale o intellettuale". Saremmo davvero curiosi di conoscere quali tratti di DNA codifichino la valutazione della dignità morale o intellettuale!

24. LINGUAGGIO E CONSAPEVOLEZZA

Qualcuno vuole unificare queste due proprietà del sistema nervoso umano al punto di affermare che non esiste consapevolezza senza linguaggio. Come dire che solo gli umani sono consapevoli. Questa affermazione ovviamente non è validata, come d'altro canto non è validata neanche l'ipotesi che anche animali meno evoluti siano pensanti e consapevoli, sebbene sussistano forti indizi al riguardo sulla base di numerose osservazioni in ambiente naturale o sperimentale, come ad esempio il test dello specchio in scimmie od elefanti o corvidi (sì, i corvi con il loro cervellino di pochi grammi dimostrano capacità cognitive pari alle scimmie antropomorfe… e neanche hanno le mani!, per non parlare dei delfini).

Pensiero senza parole

Si può pensare senza parole? Sicuramente sì, ma non è facile accettarlo perché per noi il linguaggio è l'asse portante per l'interpretazione del mondo. Nella nostra specie qualunque pensiero è una sequenza di immaginazioni sensoriali (*percezioni immaginate*) di fatti od oggetti, che abbiamo *classificato* fenotipicamente in modo personale, con le proprie caratteristiche (*posizione, movimento, colore, sonorità ecc*.) alla quale abbiamo aggiunto un simbolo, un *nome,* che con la sua sonorità assume la posizione preminente tra le altre caratteristiche per distinguerlo sinteticamente e per il vantaggio che produce nella comunicazione.

La classificazione di un fenomeno o un oggetto è un fantastico processo cognitivo del tutto automatico e implicito, una sorta di *compressione* delle informazioni più rilevanti di quel fenomeno, derivato dalla propria sensorialità allo scopo di poter *riconoscere* altri fenomeni simili ma non identici anche dalla percezione solo di *alcuni* elementi che questi hanno in comune, per le su descritte capacità associative della memoria biologica. Ed è questa classificazione che viene memorizzata e poi ricordata, non tutta la sensorialità del reale fenomeno. Per questo è molto difficile immaginare qualcosa che abbiamo già classificato togliendo volontariamente qualche elemento caratteristico importante. Difficile immaginare una banana senza il colore giallo o, ancora di più, senza il nome *banana*.

Ma nelle specie senza linguaggio che, dal comportamento dimostrato, sicuramente pensano (molti mammiferi e alcuni uccelli), come si articola il pensiero? In queste specie deve essere inevitabilmente già comparsa la capacità di *classificare* eventi e oggetti, estrapolandoli dallo sfondo della scena ambientale, e quindi anche per loro il pensiero deve essere una sequenza di percezioni immaginate e classificate con le loro capacità sensoriali (vista, udito, olfatto ecc.) senza il nome. Una scimmia probabilmente classifica la banana come "cosa buona da mangiare, morbida, profumata, gialla, allungata, che si può staccare da altre cose." Quando *dico* al mio cane "vai a prendere la palla" che non è in vista, e lui la cerca e la riporta, evidentemente ricorda quell'oggetto che ha classificato

sensorialmente e che ha arricchito anche con la *sonorità* del nome che io pronuncio, e con questa sola percezione uditiva richiama la memoria complessiva della *sua* classificazione dell'oggetto. Sembra che un cane ben addestrato possa riconoscere con la sola sonorità dei loro nomi circa 200 cose diverse.

Sicuramente il linguaggio non è essenziale al formarsi della consapevolezza; tuttavia esso incide senz'altro sul modo di funzionare della mente. Una parola, udita o letta, è un simbolo, una rappresentazione che riassume le caratteristiche salienti (utili nel contesto in cui quel linguaggio si è evoluto) della realtà che rappresenta. La parola *albero* veicola l'essenziale di tutti gli alberi, lasciando fuori le differenze tra i singoli alberi. Come tale il simbolo favorisce nella mente l'astrazione e la categorizzazione. Quando durante l'infanzia il bambino impara i significati delle parole egli apprende categorizzazioni e astrazioni preconfezionate. Questo ha effetti positivi ed effetti negativi.

Gli effetti positivi, oltre ovviamente alla possibilità di comunicare, sono che il bambino impara molto più rapidamente le categorie comunemente rilevanti di quanto non farebbe se dovesse scoprirle da solo; e anzi impara più rapidamente a categorizzare in generale. Questi effetti positivi non sono di poco conto, come dimostra il fatto che l'evoluzione umana ha dedicato gran parte della corteccia cerebrale a questo compito, corteccia la cui predisposizione a questo compito è trasmessa geneticamente.

Gli effetti negativi sono che questo imprinting con categorie e astrazioni e concetti socialmente comuni può finire col condizionare pesantemente le capacità di pensiero dell'individuo, sfavorendo le astrazioni innovative, che mal si prestano ad essere tradotte in linguaggio comune in quanto raramente esperite o formulate nella specie o nella società. Se l'individuo si abitua a pensare sempre tramite parole, le sue capacità di formulare concetti mal esprimibili a parole sono sfavorite. All'estremo si può addirittura arrivare a pensare che il mondo vero sia quello dei concetti esprimibili con il linguaggio, che la realtà sia solo una versione imperfetta di quel mondo ideale, e che la logica basata sul linguaggio sia l'unico modo per comprendere la realtà (come ha creduto buona parte della filosofia occidentale); o, in una versione più moderna, che, se non la realtà, almeno la mente funzioni solo sui concetti esprimibili con il linguaggio, e quindi la linguistica sia un buon metodo per la comprensione della mente (come ha creduto parte della psicologia cognitiva).

Questa confusione nasce essenzialmente dall'identificare parola e concetto. In realtà le parole non coincidono con i concetti, ma sono solo un modo per codificarli simbolicamente. Un'immagine, un disegno, un suono, un'equazione matematica, sono codifiche altrettanto possibili. Un disegno è però più idoneo a rappresentare oggetti piuttosto che fatti, e un'equazione è più idonea (molto più del linguaggio) a trasmettere concetti di fisica piuttosto che a comunicare sentimenti ed emozioni.

Un passo indietro; le origini del linguaggio poggiano sulla capacità di espressione sonora di molte specie animali anche molto primitive (insetti e anfibi). In questi animali l'espressione sonora è un mezzo di comunicazione *emotivo* a distanza, delle proprie condizioni contestuali (pericolo, richiamo sessuale, manifestazione di territorialità). Nel processo evolutivo dei mammiferi sociali l'espressione sonora acquisisce anche significato di vera e propria comunicazione intenzionale ai fini di influenzare un comportamento di gruppo (caccia, fuga) che dimostra la capacità di una previsione ambientale anche se a breve termine. Solo nella specie Homo Sapiens la sonorità diventa linguaggio con capacità di comunicare intenzionalmente e dettagliatamente eventi sensoriali passati e futuri.

In realtà il linguaggio fa fatica a descrivere *compiutamente* le sensorialità percepite. La visione è ottima per la descrizione di caratteristiche ambientali, la posizione, la forma e la numerosità degli oggetti e di altri viventi, ma per trasmettere le proprie sensazioni, la percezione cromatica, (il colore di un fiore) si può utilizzare solo qualche decina di definizioni (i nomi dei colori spettrali e non spettrali come il bianco, il nero, il viola o il marrone) o similitudini con oggetti noti colorati "il colore della rosa", mentre la capacità individuale di distinguere tra una gamma di migliaia di combinazioni di luminosità e cromaticità è elevatissima. I display televisivi attuali mostrano milioni di combinazioni cromatiche che migliorano la percezione dell'immagine ma che nessuno riesce a *descrivere* precisamente. Per il gusto si utilizzano solo quattro caratteristiche (dolce, salato, acido, amaro) mentre la gamma di percezioni miste è molto più ampia. Peggio ancora per gli odori, per i quali ci si affida solo a similitudini come "profumo di rosa" o "odore di uova marce". Per il tatto non va davvero meglio (ruvido, liscio, caldo, freddo, asciutto, bagnato). Insomma il linguaggio non sembra idoneo alla descrizione accurata delle percezioni sensoriali: perché? Perché non si è sviluppata la capacità di descrivere la *qualità precisa* della percezione? Evidentemente la precisione descrittiva non serve, altrimenti i meccanismi evolutivi avrebbero sicuramente sviluppato questa capacità. La *qualità sensoriale* è davvero una caratteristica individuale che dipende dalla costituzione, dall'ambiente nel quale il singolo individuo interagisce e sicuramente dall'invecchiamento, per cui la qualità del profumo di una rosa che sento io è diversa dal quella che senti tu e cosi per tutto il resto, i colori, il caldo e il freddo, eccetera. Sono note infatti molte varianti genetiche per il senso cromatico (daltonismo), per il gusto e l'olfatto. Se l'evoluzione non è stata pressata a uniformare e stabilizzare queste capacità sensoriali evidentemente è risultato più efficace consentire la variabilità genetica e mantenere l'adattabilità fenotipica individuale per interagire al meglio con il proprio ambiente. È noto che gli Esquimesi abbiano diverse parole per indicare le molte qualità di neve, in base alle sfumature di bianco, che solo loro sono in grado di distinguere. Di conseguenza anche il linguaggio si è adattato a trasmettere queste informazioni personali in modo davvero approssimativo perché la percezione precisa individuale non è condivisibile. Sono le esigenze tecnologiche che hanno richiesto progressivamente misure precise e universali delle grandezze fisico-chimiche che i nostri sensi percepiscono, e per questo si sono dovuti inventare strumenti e unità di misura per descrivere compiutamente queste percezioni, senza però avere la garanzia che la misura della grandezza fisica (luminosità, cromaticità, pressione sonora, sapidità etc.) venga percepita ugualmente da tutti gli individui.

Così il linguaggio si è affermato per la comune comunicazione (e si noti la medesima radice etimologica di *comune* e *comunicazione*) in quanto efficace a trasmettere ciò che è utile sapere in comune, e l'esatta qualità della percezione sensoriale personale evidentemente non lo è perché può essere diversa in ogni individuo ed evidentemente è meglio che sia così.

Come abbiamo detto l'aspetto più rilevante della comunicazione linguistica è che non solo consente la trasmissione di alcuni aspetti della realtà contestuale, ma anche la trasmissione di percezioni passate e future, di ricordi, intenzioni e progetti. Questo offre la possibilità d'indirizzare il comportamento di molti individui verso finalità previste da pochi. Clamorosamente non solo il presente può essere condiviso, ma anche il passato e il futuro. Questa sembra essere una delle principali caratteristiche che differenzia la specie umana da tutte le altre.

Nei mammiferi, in particolare nei predatori, l'espressione vocale non linguistica (belato, ruggito etc.) è elicitata dalle emozioni come utile mezzo di comunicazione a distanza, intra e interspecifica, per avvisare della presenza di pericoli, di risorse ambientali contestuali o difendere il territorio. Le radici di questo comportamento sono presenti anche nella specie umana quando una forte emozione scatena automaticamente esclamazioni nel linguaggio culturalmente appreso, senza la necessità di una piena consapevolezza se non a posteriori. E come nei suddetti mammiferi predatori il comportamento geneticamente acquisito è ben diverso tra i due generi (riduttivamente: nei maschi *esplorazione e controllo del proprio territorio* e nelle femmine *cure parentali*) così anche nella specie H. Sapiens il comportamento e l'espressione linguistica è differente geneticamente nei due generi, anche se l'apprendimento culturale individuale può modificarlo molto.

Nei maschi umani il comportamento è tipicamente esplorativo solitario e di tipo seriale (single-tasking), nelle femmine invece è tipicamente sociale e parallelo (multi-tasking). Nella comunicazione verbale i maschi, generalmente, sono laconici e comunicano essenzialmente **fatti** mentre nelle femmine la comunicazione è prolissa e concerne prevalentemente **sentimenti**. E ci sono buone ragioni evolutive per questa differenza comportamentale, potete quindi anche capire che sforzo entrambi i generi debbono fare per comprendersi!

Queste considerazioni spiegano l'enorme vantaggio comunicativo che il linguaggio rappresenta rispetto ad altre modalità comunicative e il conseguente predominio di questa modalità in termini darwiniani, con aumento della pressione evolutiva verso cervelli sempre più *parlanti*. Ma Il linguaggio umano si è evoluto principalmente per descrivere oggetti, fatti, stati d'animo o emozioni, e risulta molto meno utile per descrivere relazioni tra componenti di un sistema complesso o il suo funzionamento. In questi casi si deve ricorrere spesso a simbolismi dedicati come la matematica o ad immagini grafiche statiche o dinamiche. Essendo dunque il linguaggio corrente uno strumento poco adatto a *descrivere* il funzionamento dei sistemi nervosi, tanto meno dovrebbe essere preso in considerazione per *spiegare* il loro funzionamento. "Per il connessionismo il linguaggio non svolge nessun ruolo centrale nello studio della mente" (Domenico Parisi, 2002). A nostro avviso, non solo non svolge nessun ruolo centrale, ma è addirittura controproducente se lo si assume come modello d'interpretazione della mente umana. Come i potenziali elettrici e le molecole di mediatore chimico sono il mezzo con cui i neuroni comunicano, le parole sono il mezzo con cui comunicano gli individui: il linguaggio è critico per interpretare la mente sociale (ammesso che questa esista), non la mente individuale.

Confondere sociale e individuale si aggiunge alla già denunciata confusione tra codifica e concetto. Ciò non toglie che dovremo continuare ad usare il linguaggio per cercare di trasmettere qualche informazione, che è appunto il motivo per cui questo esiste: un mezzo per comunicare realtà o interpretazioni della realtà, non per studiarle. Fin troppi errori sono stati già fatti dalla filosofia occidentale che, da Aristotele e Platone in poi, ha confuso fenomeni e descrizioni fino al punto di credere che la logica basata sul linguaggio fosse un metodo valido, magari addirittura l'unico metodo valido, per indagare e comprendere la realtà.

Il cervello umano ha di certo subito una forte pressione evolutiva a sviluppare ed espandere capacità linguistiche per le proprietà che abbiamo descritto. La consuetudine quindi ad identificare i simboli

linguistici con gli oggetti che descrivono, e privilegiare questa rappresentazione ad altre, ha fatto pensare a molti (non a tutti) che senza linguaggio la mente non esista. Questo ulteriore peccato antropocentrico deve essere contestato. La mente e la consapevolezza, in forme più semplici di quelle umane, devono essere presenti anche in animali privi di linguaggio, per la semplice considerazione che tutte le conquiste evolutive sono graduali, che se ne trovi traccia o meno. La motivazione degli *anelli mancanti* è del tutto inconsistente in questo ambito perché, purtroppo, mentre è relativamente facile trovare reperti fossili che giustifichino le variazioni morfologiche più o meno progressive tra le specie, è assai più difficile identificare tracce fossili che permettano di ricostruire un percorso evolutivo del comportamento, in particolare di quello cognitivo. Qualche possibilità d'individuare comportamenti consapevoli in animali viventi filogeneticamente distanti dagli umani comincia ad apparire da studi sulla comunicazione intraspecifica dei delfini e delle scimmie, ove il vasto repertorio comportamentale mimico e fonetico che consente la trasmissione di esperienze individuali può essere considerato un linguaggio primitivo. In alcune scimmie (cercopiteco verde) sembra confermata la presenza di un linguaggio trasferito culturalmente che consente di avvisare tutto il gruppo di risorse e pericoli individualmente riconosciuti e ben specificati. La visione di un'aquila è associata ad un grido molto diverso da quello emesso in presenza di un serpente, e questo vale per una decina di stimoli diversi, e per di più alcuni vocalizzi specifici possono essere usati per ingannare volontariamente altri individui della comunità.

A questo proposito abbiamo già detto che l'osservazione di un inganno può essere un ottimo indicatore di consapevolezza, poiché l'individuo che lo mette in atto deve immaginare una situazione sicuramente diversa dalla realtà percepita o ricordata, deve poterla distinguere da questa, e deve utilizzarla intenzionalmente prevedendone gli effetti. Naturalmente parliamo di un inganno fenotipicamente inventato, utilizzato in modo sporadico e volontario; altrimenti, se s'intende l'inganno in senso lato, si finisce per includere anche il mimetismo, che ovviamente non è indicativo di pensiero e tantomeno di consapevolezza…. lo fanno anche i fiori!

25. LIBERO ARBITRIO?

Può apparire oltraggioso relegare questo argomento, considerato portante della consapevolezza umana e prerogativa della nostra specie, in un capitolo così ristretto. Ma da quanto abbiamo premesso l'argomento può essere fortemente ridimensionato, e potrebbe addirittura essere omesso da un punto di vista biologico, se non fosse per le implicazioni sociali che comporta.

Non è il caso di addentrarci in valutazioni neurofisiologiche, che peraltro confermano che la consapevolezza di un'azione volontaria è preceduta di circa 500 millisecondi da una attivazione di una ben definita area corticale premotoria che prepara l'azione, come dire la consapevolezza dell'azione volontaria è successiva all'innesco di questa (sic!). Qualcuno aggrotterà la fronte e molti pensatori si sono arrovellati sulla spiegazione di questo fatto, ma se consideriamo la consapevolezza non *l'*origine dell'azione volontaria, ma solo *la sua percezione cosciente*, e che l'azione non è scatenata solo da afferenze sensoriali contestuali, ma anche da memorie interne, questa latenza non meraviglia più di tanto, così come non ci meravigliamo che la percezione cosciente di una sensazione attuale arrivi con un ritardo di parecchi millisecondi dall'attivazione dei sensori corporei. Dunque il concetto di libero arbitrio è una conseguenza del dualismo cartesiano mente/cervello. Se questa visione era accettabile fino ad un paio di secoli fa, oggi è del tutto immotivata: non vi è alcun dualismo, noi siamo il nostro cervello, o, come abbiamo già detto, la mente è il funzionamento del cervello (della parte più recente di questo). Tutto il nostro comportamento appreso è conseguente al funzionamento delle reti neuronali che accumulano (memorizzano) fatti ed esperienze nel corso dell'esistenza.

Baruch Spinoza (1632-1677) ha scritto: "*Gli uomini si credono liberi perché sono consapevoli delle proprie azioni e inconsapevoli delle cause che le provocano*". Che dire di più? Aveva capito tutto. Potremmo concludere qui, ma forse possiamo spendere qualche parola in più per portare altra acqua al suo mulino.

Tagliamo corto: la scelta operativa non è affatto *libera*, è solo apparentemente tale, perché per la sua valutazione abbiamo accesso cosciente solamente al repertorio di memoria esplicita costruito progressivamente nel corso della nostra vita, e non possiamo essere minimamente consapevoli della pressione esercitata dal ben più vasto repertorio di memoria implicita geneticamente e fenotipicamente accumulato, oltre alla quantità enorme di memoria estesa disseminata nell'ambiente, che indirizza, in gran parte automaticamente, il nostro comportamento quotidiano. Il paragone più

scontato è quello dell'iceberg: la consapevolezza è la parte emersa, ma la ben più voluminosa parte immersa è quella che ne determina la linea di galleggiamento (Fig. 56).

Fig. 56. La scelta comportamentale consapevole è solo apparentemente libera.

In definitiva in ogni istante lo stato di ogni rete neuronale è completamente determinato, dal punto di vista funzionale e strutturale, dalla struttura iniziale della rete (geneticamente determinata), e dalla sequenza degli stimoli ricevuti dall'inizio dell'esistenza fino all'istante attuale. La sequenza di tali stimoli a partire dalla nostra formazione embrionale costituisce la nostra storia personale, le nostre esperienze; e l'insieme degli effetti fenotipici di queste esperienze, unitamente alla conformazione genetica della nostra rete neuronale, costituisce ciò che attualmente siamo, la nostra *personalità*, i nostri modi di pensare e di reagire. Naturalmente anche la percezione attuale influenza il comportamento che sta per essere effettuato. In definitiva il comportamento è deterministico ma non prevedibile. Abbiamo già utilizzato questi termini per definire un sistema complesso.

In precedenza abbiamo detto che una importante funzione della consapevolezza è quella di costruire progressivamente comportamenti riflessi (trasformare comportamenti frequenti, inizialmente intenzionali, in comportamenti automatici riflessi), e abbiamo spesso usato l'esempio dell'apprendimento cosciente della guida di veicoli e della progressiva trasformazione in guida automatica. Questo processo di automazione riguarda anche il comportamento etico, nel senso che un

adeguato apprendimento delle conseguenze di certe azioni, congiuntamente con l'esperienza emotiva (sentimento) di piacere o dolore che ne è conseguita, può nel tempo automatizzarsi e plasmare, entro certi limiti, la personalità (il modo di comportarsi). Qualcuno dice che si diventa saggi con l'età, certo ma con valenze diverse per ognuno di noi.

Insomma il libero arbitrio sulle decisioni contestuali non esiste; queste sono pilotate dalla personalità del singolo che è costituita dal comportamento emotivo ereditato geneticamente e progressivamente modulato dalle memorie di esperienze e dall'apprendimento fenotipico. Soggetti con patologie prefrontali spesso non riescono ad utilizzare queste memorie, e manifestano un comportamento impulsivo prodotto quasi esclusivamente dai riflessi emotivi paleoencefalici.

In conclusione: la questione è mal posta, Il libero arbitrio è certamente libero, se s'intende *da vincoli esterni*; non è certamente libero, e non lo potrebbe essere, se s'intende da *vincoli interni*. Non esiste nulla libero da vincoli interni! Le *proprietà* stesse di qualunque cosa, sia essa oggetto o evento ecc., sono di fatto vincoli. Se non vi sono vincoli interni non vi è sistema nervoso, vi è il nulla.

26. CONSIDERAZIONI RIASSUNTIVE

Sull'evoluzione del sistema nervoso

Prima di passare ad una descrizione degli esperimenti effettuati con reti neurali artificiali che confermano la potenza dei meccanismi evolutivi darwiniani e che ci hanno permesso di verificare alcune delle ipotesi sull'emergenza ed il funzionamento dei processi cognitivi umani, riassumiamo brevemente alcuni concetti che abbiamo trattato finora.

Se in un certo ambiente compare casualmente un **replicante imperfetto** (mutazioni) che genera un numero variabile di copie un poco differenti dal "genitore" e tra di loro, queste verranno **selezionate differenzialmente** nella sopravvivenza dalle condizioni ambientali, e si innescherà un cieco processo evolutivo inarrestabile e ricorsivo fino a che le condizioni ambientali lo consentiranno. Questo replicante può essere una struttura atomica o molecolare o una "informazione" un codice, un meme, una ricetta, un progetto, un comportamento, un programma informatico, e il processo evolutivo tenderà incessantemente e automaticamente a selezionare e riprodurre le copie più performanti a discapito delle altre se le risorse sono limitate. In questo libro abbiamo descritto a grandi linee il processo evolutivo biologico che ha prodotto, in qualche miliardo di anni, la trasformazione da isolate microscopiche cellule acquatiche a organismi terrestri multicellulari di grandi dimensioni, gli ultimi di quali anche consapevoli di esistere e di comprendere questo cieco processo.

La presenza di organismi multicellulari mobili ha indirizzato l'evoluzione verso la comparsa di meccanismi di controllo sensori-motorio come le prime reti neuronali degli anellidi e progressivamente verso sistemi nervosi veri e propri sempre più complessi e articolati con reti variamente connesse, che hanno permesso la *rappresentazione* di eventi sensoriali e motori attraverso configurazioni di attivazioni/inibizioni di gruppi di molti neuroni tra loro connessi e quindi lo sviluppo di sistemi reattivi sensori-motori come i riflessi congeniti, poi quelli acquisiti (riflessi condizionati) e infine comportamenti intenzionali, tramite l'apprendimento e l'utilizzo delle relazioni causa-effetti (**nessi causali**) nell'interazione con l'ambiente. Questo ha aumentato notevolmente la probabilità di evitare pericoli e di trovare risorse e quindi la sopravvivenza e riproduzione dell'individuo.

La vita, dall'organismo più semplice al più complesso, è sostenuta dall'interazione con l'ambiente e con le altre specie viventi in esso. Abbiamo definito questa interazione mediante la **tripletta associativa,** che ripetiamo essere costituita da una sequenza temporale di tre eventi: *una percezione sensoriale contestuale, una azione o un evento nell'ambiente e la percezione sensoriale delle sue conseguenze* che ci indica che non si può studiare isolatamente il funzionamento del sistema nervoso se non immerso nell'ambiente in cui opera, per gli inneschi sulle azioni e le retroazioni sensoriali inevitabili e necessarie.

I riflessi congeniti sono conseguenti ad una memoria di specie che struttura i collegamenti tra l'equipaggiamento sensoriale dell'organismo e l'equipaggiamento motorio-secretivo, cosicché certi stimoli ambientali provocano automaticamente l'attivazione finalistica di meccanismi motori (orripilazione, salivazione, evitamento nocicettivo). Nessun apprendimento individuale è necessario.

I riflessi appresi (riflessi condizionati) richiedono la presenza di una capacità di memorizzazione individuale di esperienze sensoriali. Nei più semplici (*condizionamento associativo*, riflessi Pavloviani), che associano un nuovo stimolo ambientale (suono di campana) ad un riflesso congenito (cibo → salivazione) non è necessaria consapevolezza dell'associazione: il nesso causale cibo → salivazione è già presente congenitamente, si tratta di ampliare il contesto sensoriale che lo scatena associando la *presenza di cibo* con il *suono di campana*. L'associazione (l'apprendimento, la memorizzazione) è effettuata, con la ripetizione, in modo automatico secondo la regola di Hebb (v. cap. 22 *Memoria e apprendimento*).

Nei riflessi acquisiti più complessi (*condizionamento operante*, gabbie di Skinner) il nesso causale tra stimolo e risposta non è congenitamente presente e deve essere individuato. Per questo è necessaria l'associazione innovativa (la memorizzazione) di tre eventi: lo stimolo sensoriale iniziale (la vista di una leva), l'azione innovativa (la pressione della leva) e lo stato sensoriale conseguente l'azione (la comparsa del cibo) che consente l'apprendimento automatico del nesso fra i tre elementi. Entrambi questi riflessi condizionati, associativo ed operante, sono comunque sempre evocati da una **sensorialità ambientale contestuale**, e una volta appresi, vengono erogati automaticamente se vengono mantenuti dalla retroazione sensoriale, conseguente l'azione se utile per l'individuo, altrimenti si estinguono più o meno rapidamente.

Abbiamo descritto le *emozioni* come reazioni multisistemiche riflesse, in parte congenite in parte acquisite (condizionate), generate nel paleoencefalo, che producono comportamenti più o meno stereotipati per fronteggiare efficacemente eventi ambientali e relazioni sociali **contestuali**. La percezione cosciente dell'emozione o di altre percezioni sensoriali contestuali, il *sentimento*, costituisce la prima manifestazione di consapevolezza nel processo evolutivo perché valuta l**'effetto** dell'attivazione emotiva sulla propria **persona e** molto probabilmente è presente anche in specie a noi prossime. Il suo effetto sull'individuo, percepito come **positivo/negativo** (piacere/dispiacere) permette di modulare estemporaneamente l'espressione dell'emozione (prevalentemente inibirla) in relazione al contesto*.* Il *sentimento* dunque è legato al momento, è **una consapevolezza solo attuale.**

Il passo evolutivo successivo è l'*immaginazione*, la capacità di rappresentare nelle strutture prefrontali l'effetto sulla propria persona **di sensorialità non contestuali,** che estende l'ambito della consapevolezza al proprio passato o al proprio futuro. Nella tripletta virtuale immaginata non è presente l'azione e di conseguenza neanche la retroazione sensoriale ambientale reali e allora la *causa* della rappresentazione nelle reti neuronali, l'immaginazione, viene attribuita alla propria persona **"io sento di** immaginare**….io sento di** pensare**".**

Osiamo modificare la frase di Cartesio in: "io penso dunque sono….. **consapevol*e***"**.**

E ne proponiamo un'altra: "**se menti io so che sei consapevole!**".

Come abbiamo detto nel capitolo evoluzione la retroazione ambientale accelera e orienta i processi evolutivi producendo specie sempre più complesse e in grado di modificare intenzionalmente l'ambiente nel quale vivono. È una retroazione di tipo *positivo* nel senso che amplifica le cause che la producono e quindi aumenta progressivamente la pressione evolutiva verso specie sempre più complesse in grado di modificare consistentemente l'ambiente, come nel caso della nostra specie, ultima arrivata (forse definitivamente l'ultima!).
Ma nel corso evolutivo della nostra specie è comparso un altro replicante il **meme** (capitolo 10) che ha consentito l'evoluzione culturale e tecnologica anch'essa con sviluppo esponenziale velocissimo negli ultimi decenni il cui ultimo prodotto l'intelligenza Artificiale comincia a spaventarci perché subdolamente ci sottrae il potere decisionale in moltissime situazioni, è i suoi progressi sono giornalieri, non annuali! Insomma nella precedente rivoluzione industriale le macchine hanno sopperito al lavoro manuale e ripetitivo con notevoli vantaggi per molti umani (anche se all'inizio hanno prodotto un terremoto sociale con grandi proteste) ma oggi questa nuova **rivoluzione mentale** rischia di trasformarci in una specie in estinzione superata da una specie sintetica non biologica. Non è catastrofismo è una possibilità concreta perché il processo iniziato è inarrestabile a meno di eventi planetari che resettino il sistema ad alcuni milioni di anni indietro.

Riassumendo:

- I meccanismi evolutivi tendono a saturare l'ambiente con forme di vita sempre più complesse. L'aumento di complessità dei viventi è funzione della costante ricerca di indicatori nell'ambiente che possono aumentare le risorse e ridurre i pericoli per la propria esistenza/riproduzione. Il sistema nervoso e la sua evoluzione ne sono l'espressione più recente ed efficace comparsa su questo pianeta.

- Inizialmente la comparsa di recettori sensoriali specifici e la loro connessione con effettori e secretori adeguati assicura il rifornimento energetico e l'evitamento di alcuni pericoli. Progressivamente Il riconoscimento di nessi causali nell'interazione ambientale (tripletta associativa) costituisce la spinta evolutiva principale per la comparsa di riflessi geneticamente ereditabili (emozioni), successivamente di riflessi fenotipici (condizionati) e da ultimo di comportamenti intenzionali.

- Eseguire comportamenti intenzionali efficaci significa eseguire *scelte* tra comportamenti diversi conoscendone o prevedendone le conseguenze. È quindi necessario che il sistema possa costruire una rappresentazione sensoriale interna di alcuni eventi esperiti, memorizzarli e poterli utilizzare per riconoscere situazioni uguali o simili (classificare e generalizzare il riconoscimento), ovvero *percepire* elementi rilevanti dell'ambiente. Queste capacità che emergono spontaneamente nelle reti neuronali plastiche, sono il presupposto per la *consapevolezza.*

- La Consapevolezza è una *funzione emergente inevitabile* nell'evoluzione progressiva del sistema nervoso conseguente l'attività delle strutture encefaliche più recenti, le cortecce prefrontali, per i

vantaggi conservativi e riproduttivi che produce. Si manifesta con una componente **privata**, il *sentimento* che emerge come percezione dei riflessi emotivi generati nel paleoencefalo per il loro **effetto sulla propria persona**, e quindi con una estensione dell'apprendimento dei nessi causali tra la realtà e l'effetto positivo/negativo su di sé con la conseguente possibilità di una modulazione comportamentale, è una consapevolezza solo contestuale. Ed una componente **pubblica,** il *comportamento* nell'ambiente osservabile dall'esterno. Successivamente la consapevolezza si manifesta pienamente quando compare la capacita di *immaginare* una rappresentazione sensoriale non contestuale che consente l'azione o la progettazione di azioni intenzionali (tripletta virtuale) in *previsione dell'effetto* che queste produrranno sull'ambiente e sulla propria persona. La necessaria *distinzione* della percezione del reale contingente dall'immaginato può essere implicita. Se la rappresentazione prefrontale coincide con la sensorialità contestuale si ha *consapevolezza della realtà*, (degli effetti della sensorialità della realtà sulla propria persona) ma se non coincide, la rappresentazione è riconosciuta come *immaginazione* (ricordo, previsione..) e mancando anche l'azione e la retroazione sensoriale ambientale reali, la *causa* dell'immaginazione è attribuita alla propria persona (**io immagino… io penso….**) e questa volta gli effetti della sensorialità immaginata sono anch'essi immaginati, e questo può costituire una *previsione*).

- La presenza della componente pubblica, che nella specie umana è arricchita da una codifica simbolica linguistica, dovrebbe far capire che la consapevolezza, come altre modalità cognitive, non è localizzata *dentro* il cervello, ma si manifesta nell'interazione con l'ambiente e gli altri viventi, (anche l'assenza di un comportamento visibile è un comportamento). La tripletta insegna che è assolutamente necessario valutare gli effetti della retroazione sensoriale del comportamento manifestato per gli studi in questo ambito. Come dire la sola introspezione non serve a nulla.

- Se un comportamento innovativo cosciente viene ripetuto frequentemente questo può diventare un riflesso (un riflesso condizionato) e la consapevolezza svanisce. In questo caso si può dire che *la coscienza serve per costruire riflessi* senza esporsi ai rischi (prova ed errore) che l'apprendimento di un riflesso condizionato comporta.

Rispondendo sinteticamente alle domande alla fine del capitolo 4:

D.: Come funziona la mente?
R.: Secondo il modello connessionista (vedi avanti).

D.: Cosa è la coscienza?
R: il *sentimento* degli effetti sulla propria persona, della interazione con l'ambiente reale o immaginato.

D.: A cosa serve e perché è comparsa?
R.: Per valutare gli effetti *sulla propria persona e sull'ambiente* di ciò che si percepisce o si immagina distinguendo tra la *percezione* della realtà e l'*immaginazione* di questa, con la possibilità di *predire* gli effetti del proprio comportamento volontario. Conoscere o immaginare una *causa* (un evento o un'azione) e le *sue conseguenze sensoriali* costituisce un notevole vantaggio per le scelte operative più

efficaci. Inoltre con la ripetizione di queste azioni intenzionali, queste possono essere utilmente trasformate in rapidi *comportamenti riflessi condizionati.*

D.: Quali sono i suoi correlati neuroanatomici?
R.: La corteccia prefrontale e le sue connessioni con tutte le altre strutture cerebrali.

D.: Quali sono i metodi attuali più proficui per questi studi?
R.: Le simulazioni tramite Connessionismo Evolutivo (reti neurali artificiali, vedi avanti).

27. IL CONNESSIONISMO

Per comprendere appieno l'importanza del connessionismo per la conoscenza del sistema nervoso attraverso modelli a reti neurali artificiali, reputiamo utile un richiamo ai meccanismi evolutivi già descritti che hanno generato i sistemi nervosi dal più semplice al più complesso.

Il meccanismo che spinge l'evoluzione è il processo di *replicazione*. Questo processo anche a livello di materia inorganica (cristalli) richiede due condizioni: la presenza di un prototipo da replicare, e materia ed energia per produrre la copia.

In ambito biologico i primi replicatori (batteri) hanno sviluppato processi che utilizzano costituenti dell'ambiente utili a mantenere integro il prototipo (il corpo e anche la sua ricetta, il DNA) almeno fino alla sua replicazione. Abbiamo visto come la variazione casuale delle copie produca innovazioni, più utili o più dannose, nella utilizzazione di risorse per mantenere in vita l'individuo e consentirgli la replicazione. La selezione ambientale (*selezione naturale* Darwin) favorisce le innovazioni più utili e conseguentemente spinge il processo evolutivo verso organismi sempre più complessi ed efficaci nella sopravvivenza.

Dunque il riconoscimento di risorse è fondamentale. Alcuni viventi (piante e animali sessili) hanno sviluppato sistemi per raccogliere quelle che intercettano localmente, altri hanno sviluppato organi di movimento per la loro ricerca attiva nell'ambiente, ma tutti hanno in comune lo sviluppo di *sensori* che attivano *effettori* in grado di cogliere queste risorse. Il processo fondamentale è quindi *la trasformazione dell'informazione sensoriale in azione e/o secrezione.*

Finché l'animale è di piccolissime dimensioni (batteri) un cambiamento delle condizioni chimiche all'interno del corpo, conseguente ad uno stimolo chimico-fisico dall'ambiente, è in grado di produrre movimento del corpo stesso o di sue appendici (ciglia-flagelli); ma quando l'animale aumenta di dimensioni, come abbiamo già descritto, compaiono meccanismi di trasmissione dell'informazione sensoriale a distanza, all'interno del corpo, dei quali le reti neuronali sono il risultato più efficace.

In sintesi una rete neuronale, o la sua equivalente artificiale, è un *convertitore* che nella sua forma biologica più elementare è un convertitore sensoriale-motorio. Questa è l'essenza dei sistemi connessionisti biologici o artificiali che siano. In particolare questi convertitori sono *adattivi* nel senso che nel corso della vita dell'individuo si modificano, entro certi limiti, per adeguarsi il più possibile al mutare delle condizioni dell'ambiente e dell'individuo stesso.

Le conoscenze neurologiche accumulate in questo secolo hanno definitivamente accertato che il comportamento di sistemi biologici complessi, dotati di sistema nervoso, è conseguente al

funzionamento collettivo di molti neuroni variamente interconnessi che hanno notevoli capacità plastiche nel reciproco influenzamento. Una rete di cellule, ciascuna delle quali compie *soltanto* semplici operazioni di sommazione spaziale e temporale di segnali elettrochimici prodotti da altre cellule, variamente connesse tra loro e con strutture sensoriali e motorie, può generare comportamenti finalizzati ed efficaci per l'organismo. Questa strabiliante caratteristica del sistema nervoso è stata compiutamente compresa grazie anche alla simulazione su computer di modelli semplificati di sistemi di neuroni (neuroni artificiali) interconnessi, definiti *reti neurali artificiali*.

Ogni manifestazione comportamentale richiede una precisa mediazione tra classificazione (riconoscimento) di situazioni già sperimentate e generalizzazione di situazioni simili mai sperimentate. Il raggiungimento di un ottimale bilanciamento tra classificazione e generalizzazione della configurazione dei dati in ingresso permetterà al sistema di riconoscere correttamente anche configurazioni nuove o non completamente definite o mascherate da rumore. Questa modalità di funzionamento tipica di reti neurali biologiche, che può essere simulata su reti artificiali, rende questi sistemi altamente efficaci nell'estrarre dalla complessità e molteplicità delle informazioni in ingresso quelle caratteristiche utili ad un comportamento efficiente.

Il Connessionismo è la branca delle Scienze Cognitive che studia appunto il comportamento di sistemi fisici o matematici, esplicitamente ispirati ai sistemi nervosi biologici. Questi sono costituiti da molteplici unità elementari interconnesse, le quali singolarmente compiono operazioni molto semplici (somme, prodotti), ma che collettivamente sono capaci di prestazioni molto complesse, come il riconoscimento di configurazioni di stimoli o la generazione di sequenze numeriche finalizzate. La caratteristica intrinseca e fondamentale di un sistema neurale connessionista, come del suo equivalente sistema nervoso biologico, è appunto quella di avere capacità funzionali distribuite nel sistema non derivabili dall'osservazione del comportamento isolato di singole unità. In altri termini il tutto è superiore alla somma delle parti.

Simulazione

L'aumento delle conoscenze in ambito biologico e fisico ha subito un andamento esponenziale nell'ultimo secolo, ma ciò ha rivelato, e continua a rivelare, una complessità crescente, tanto da scoraggiare la possibilità di una comprensione funzionale dettagliata. Più si conoscono strutture e funzioni a livello microscopico, nelle quali l'instabilità fisico-chimica aumenta fino a finire nei moti browniani molecolari, più ci si meraviglia di come possano emergere strutture stabili e funzioni costanti a livelli macroscopici. Si è capito che questo dipende dalle interazioni di fenomeni molto locali (molecolari e atomici) e da processi probabilistici; ma riuscire a collegarne gli effetti nello spazio e nel tempo per spiegare il funzionamento di qualità emergenti stabili a livelli superiori appare sempre più difficile. Bisogna accettare che in natura non esistono sistemi semplici: in un modo o nell'altro sono tutti complessi, per l'inevitabile interazione che si manifesta al loro interno e tra di loro, e l'unica

possibilità di una loro parziale conoscenza è quella offerta dal metodo simulativo riduzionista, che li fa apparire semplici.

Come abbiamo detto nel cap. 4 *Sistemi complessi*, quando un sistema dinamico è complesso, anche qualora siano note le equazioni che definiscono il comportamento dei singoli elementi, non è possibile prevederne con precisione uno stato futuro. Si tratta, quindi, di sistemi deterministici, e ciò nonostante non prevedibili. In queste condizioni, quindi, se gli stati futuri del sistema non sono prevedibili, non rimane che simularne il funzionamento calcolandone gli stati futuri passo dopo passo nel corso del tempo. Simulare un fenomeno dinamico naturale presuppone la costruzione di un modello riduttivo, fisico o matematico, che rappresenti nel modo migliore le variabili ritenute utili e trascuri quelle ritenute non indispensabili. La scelta non sempre è agevole, e necessariamente è condizionata dalla scala di simulazione a cui s'intende arrivare. I sistemi connessionisti sono sistemi dinamici complessi, e la simulazione di fenomeni complessi è una delle loro principali utilizzazioni. Il neurone biologico è una macchina di estrema complessità: con l'ampliamento delle conoscenze sui meccanismi di controllo del potenziale di membrana, di sinaptogenesi, e di metabolismo cellulare, si rimane stupefatti dall'intreccio di reazioni biochimiche che si sviluppano e interagiscono efficacemente. Inoltre ogni rete neuronale non è una struttura stabile, neanche nel breve intervallo di tempo di qualche secondo, perché risente continuamente delle mutevoli condizioni metaboliche di tutto l'individuo e della rete stessa, con le retroazioni che ne conseguono. Non ci si deve meravigliare quindi che ogni sistema neuronale oscilli elettrochimicamente: considerata l'intrinseca non linearità, è impensabile che rimanga stabile. Viene da domandarsi "come è possibile che una simile complessità funzioni?" Ma questa domanda manifesta solo la limitazione della nostra attuale capacità di comprensione.

Necessariamente, per tentare di comprendere almeno a grandi linee il funzionamento di un neurone o di un insieme di neuroni, è opportuno un approccio riduttivo, limitandosi a considerare solo le caratteristiche funzionali più rilevanti del neurone e delle sue modalità interattive con altri neuroni (attivazione, inibizione, plasticità). La simulazione di un neurone biologico, o di un sistema di neuroni, può essere implementata fisicamente, in modo riduttivo come abbiamo detto, per mezzo di un circuito elettronico appositamente costruito; oppure, in modo sempre riduttivo, ma molto più economico e flessibile, matematicamente con modelli informatici. Quest'ultima è attualmente la modalità di gran lunga più diffusa, e quella che noi stessi abbiamo utilizzato. Lo studio di sistemi complessi richiede strumenti complessi, e gli strumenti informatici attuali consentono verifiche comportamentali su plausibili modelli dinamici di strutture biologiche. Si può obiettare che un modello non è la realtà, ma ad un'indagine più approfondita ci si accorge che questo è solo un problema del grado di approssimazione con cui s'intende *simulare l*a realtà, non diverso dal grado di approssimazione con cui si *osserva* la realtà. In breve, è un problema di scala. Si possono ottenere informazioni molto aderenti alla realtà del sistema cardiocircolatorio mediante modelli idraulici del cuore e dei suoi vasi senza costruire un modello dettagliato di molti miliardi di globuli rossi e bianchi e del fluido nel quale sono immersi. La simulazione è un potente strumento d'indagine, che può essere considerato per certi versi persino superiore all'osservazione sperimentale del metodo galileiano, poiché in questo caso tutte le variabili che si inseriscono nella simulazione sono controllabili, anche il tempo e lo spazio. È possibile quindi analizzare il comportamento di sistemi rapidissimi o lentissimi o non esistenti, o troppo grandi o troppo piccoli per una osservazione naturale. Gli studi etologici possono così superare il metodo di

osservazione / deduzione per passare ad una fase di modellistica / verifica sperimentale, e rendere percorribile uno studio scientifico del comportamento.

Limiti della simulazione

Spingere la modellazione verso il funzionamento dettagliato dei singoli neuroni non sembra la strada giusta per comprendere il funzionamento globale di una rete neuronale. Prima di tutto perché aumentare il dettaglio di un sistema ne aumenta la difficoltà, e quindi il rischio che alla fine la simulazione si allontani dalla realtà che vorrebbe riprodurre; e secondariamente perché il livello di simulazione con dettagli sempre più precisi non ha termine, e più si approfondisce più l'indeterminazione strutturale e funzionale aumenta, perché aumenta anche l'inconoscibilità della realtà biologica e fisica che si vorrebbe simulare (Fig. 57).

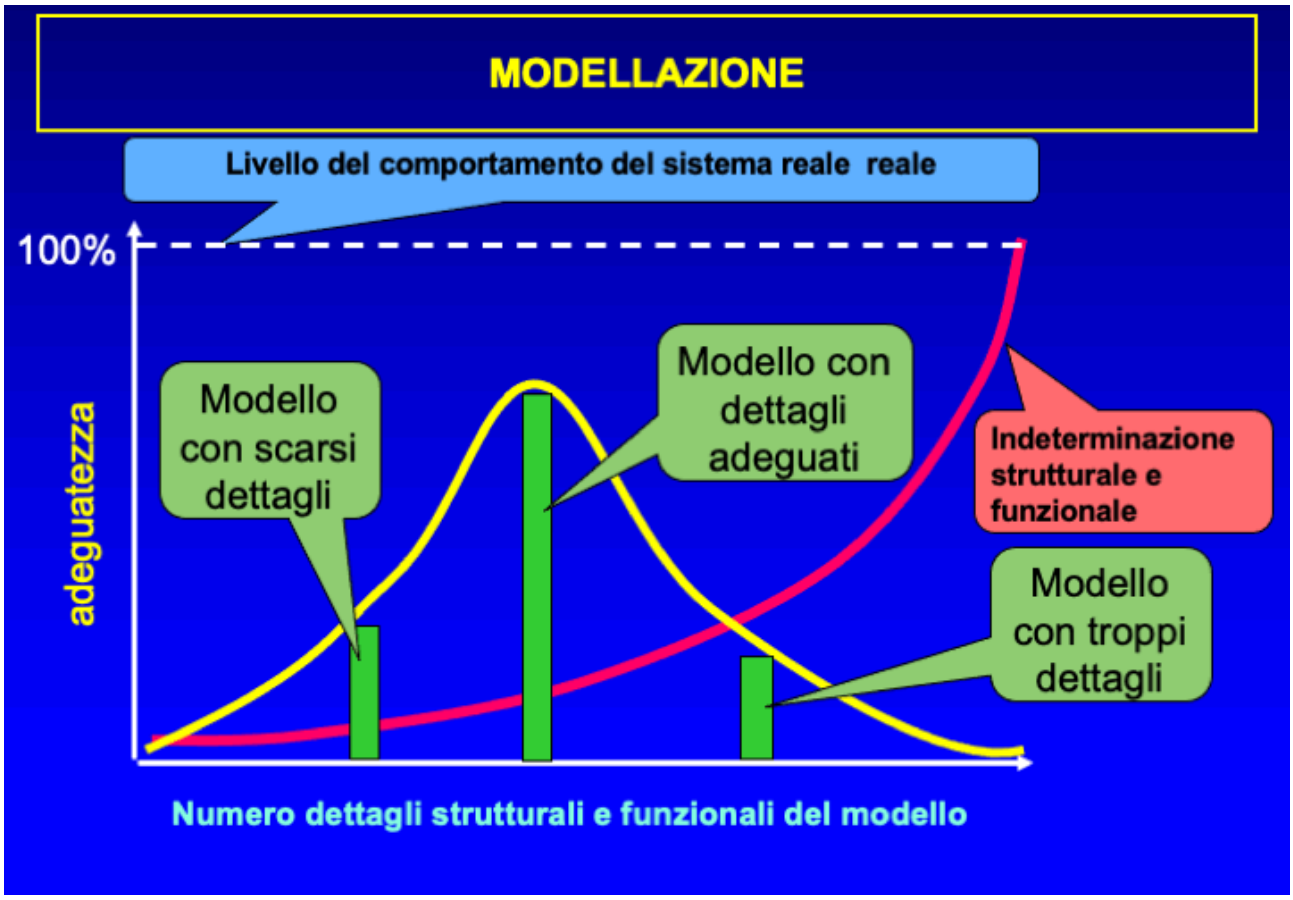
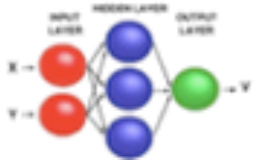


Fig. 57. Importanza del livello e numero dei dettagli simulati nel modello.

Un'altra considerazione che dovrebbe far scartare questi modelli è che è inutile approfondire la modellazione del singolo neurone per descrivere il funzionamento della rete quando ancora non si conosce affatto l'organizzazione funzionale che collega i vari nuclei neuronali encefalici, per non parlare della funzione delle sei stratificazioni neuronali della corteccia, diverse anche nelle varie aree corticali identificate.

Invece i sistemi a reti neurali, proprio per le loro caratteristiche di simulazione ad un livello meno dettagliato che considera esclusivamente i parametri di attivazione e inibizione dei singoli neuroni senza entrare nel merito della neurofisiologia della singola unità, appare più adatto alla modellazione di reti di una discreta dimensione. Ovviamente il sistema nervoso non è solo comunicazione elettrochimica fra le sue unità. Anche la comunicazione per diffusione ormonale è importante, pur non intervenendo direttamente nella configurazione specifica di pattern neuronali, ma modificando lo stato di eccitabilità della rete in conseguenza di stimoli ambientali esterni e interni, e quindi modulando la dinamica della rete. Generalmente, per una necessità di semplificazione, le simulazioni con reti neurali artificiali non prevedono l'utilizzo di questa modalità di funzionamento; ma è possibile utilizzarla simulandola come un segnale di modificazione dell'eccitabilità (bias) di raggruppamenti neurali in funzione della loro attività. Un'ulteriore omissione dei modelli a reti neurali artificiali è la modellazione di altre strutture e cellule che partecipano al funzionamento neuronale (attualmente si comincia a sospettare che le cellule gliali finora relegate al compito d'impalcature e nutrimento per i neuroni in crescita effettuino anche un compito di trasmissione di segnali chimici molto più lento di quello assonico ma pur essenziale). D'altronde anche questi aspetti possono essere automaticamente inclusi se si rimane ad un livello di simulazione non troppo dettagliato.

Reti neurali artificiali



La tecnologia *Deep Learning*, grazie ad implementazioni su telefoni cellulari di ultima generazione come riconoscitori di linguaggio e traduttori, ha riattivato l'attenzione sulle reti neurali artificiali, stranamente trascurate negli ultimi vent'anni nell'ambito delle simulazioni biologiche. Rimaniamo perplessi dal fatto che i neurobiologi non valutino ancora appieno le potenzialità di questi sistemi per la modellazione e comprensione del funzionamento del sistema nervoso. Per una descrizione dettagliata della loro costituzione e funzionamento rimandiamo il lettore a quanto abbiamo scritto nel nostro libro *Coscienza Artificiale* del 2009 o ad altre autorevoli pubblicazioni disponibili. Di seguito invece proveremo a sintetizzare quanto serve per la comprensione della metodologia utilizzata nella costruzione dei modelli sensori-motori e cognitivi che abbiamo allestito e valutato e che qui di seguito ripresenteremo in modo molto più sintetico.

La base concettuale di questi modelli risale a Hebb (1949), che per primo ipotizzò la modalità di comunicazione e connessione plastica tra neuroni biologici, e successivamente al primo modello di neurone artificiale ad opera di Mc Culloch e Pitts 1943 e Rosenblat 1950. Solo nel 1980 però con la creazione di reti interconnesse di questi neuroni artificiali implementate su calcolatori digitali ad opera di Rumelhart e Mc Lelland si è evidenziata la notevole capacità di riconoscimento di configurazioni di dati e di controllo motorio di macchine e robot. Stranamente queste capacità sono state immediatamente utilizzate con successo in ambito economico, industriale, meteorologico e di prospezione geologica, ma poco in ambito biologico, salvo qualche utilizzo in ambito medico diagnostico. Forse il fatto di essere state sviluppate da informatici e matematici ha allontanato da queste metodologie biologi e medici non abituati a modellistiche matematiche di questo tipo. Eppure

le modalità di funzionamento e la plausibilità biologica avrebbero dovuto far intravedere l'enorme possibilità modellistica che questa metodologia offriva. Comunque anche se con qualche anno di ritardo, e con approccio più timido che altrove, le reti neurali artificiali si sono affermate come il miglior modello del funzionamento delle reti neuronali biologiche. Probabilmente uno dei motivi di questo ritardo è dovuto all'iniziale e diffusissimo metodo di addestramento al compito di questi sistemi (error backpropagation) che, per quanto efficientissimo, non è biologicamente plausibile per la sua necessità di controlli esterni al sistema. Tale ostacolo è ora superato da metodi di apprendimento non supervisionati (connessionismo evolutivo).

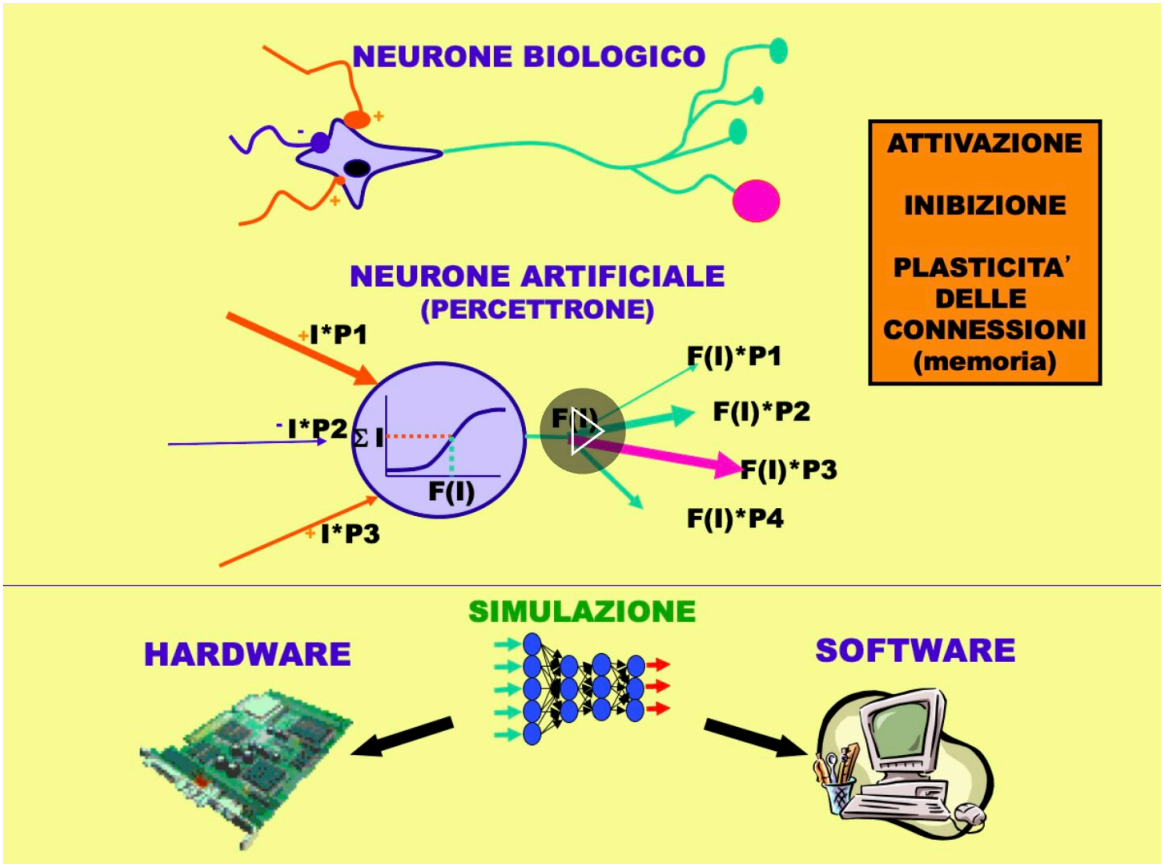


Fig. 58 (animata). Similitudine funzionale tra neurone biologico e neurone artificiale. Il pallino rosa che compare nel neurone biologico rappresenta una modificazione della potenza sinaptica e la freccia rosa nel neurone artificiale la corrispondente modificazione della potenza di una connessione in uscita.

Un neurone artificiale, d'ora in poi chiamato *unità*, è un piccolo operatore matematico che somma valori numerici d'ingresso provenienti da canali (*connessioni*) equivalenti alle sinapsi biologiche, introduce il risultato in una funzione matematica che può essere lineare, sigmoide, a scalino o cos'altro si desideri, ed invia il risultato finale a diversi canali di uscita, altre connessioni, ognuno dei quali moltiplica il valore ricevuto per un coefficiente detto *peso* della connessione. Un valore piccolo in uscita dalla funzione può essere notevolmente amplificato in una connessione, o ulteriormente ridotto in un'altra, o addirittura cambiato di segno se il peso della connessione è negativo; l'equivalente di sinapsi

eccitatorie o inibitorie (Fig. 58). La rete è costituita da un numero variabile a piacere di queste unità interconnesse, per le quali le connessioni di uscita di ognuna diventano le connessioni d'ingresso di altre (Fig. 59).

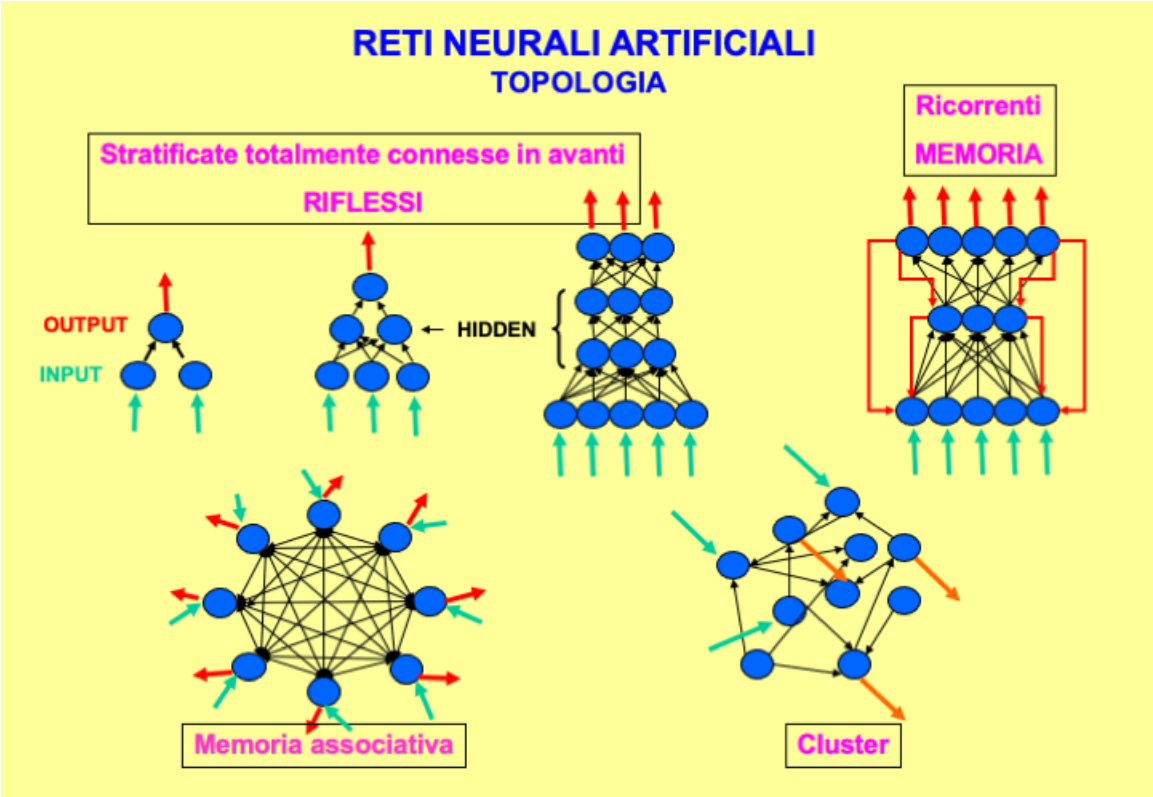


Fig. 59. Topologie di reti neurali artificiali.

Le prime reti utilizzate erano costituite in strati, tipicamente tre strati, uno di ingresso, dove si introducono i valori della configurazione che si vuole riconoscere o classificare; uno intermedio o nascosto, che ricodifica arbitrariamente i dati d'ingresso; e uno di uscita, che produce i risultati finali dell'attività della rete in forma decifrabile dall'utilizzatore. Questa configurazione, ottimale per scopi diagnostici in vari ambiti (es. entrano sintomi ed escono diagnosi), dev'essere addestrata con esempi (dati d'ingresso e uscita desiderata), e questo viene fatto automaticamente con procedure matematiche che modificano i pesi delle connessioni di tutte le unità fino ad ottenere le prestazioni desiderate. Questi sistemi presentano capacità di generalizzazione per cui possono riconoscere o classificare correttamente anche configurazioni d'ingresso simili agli esempi di addestramento ma mai presentate prima. Tuttavia questi metodi di addestramento allontanano notevolmente il funzionamento di questi sistemi da quello biologico, sia per la necessità di un *supervisore esterno* che costruisca gli esempi con gli esatti risultati da apprendere, sia per le procedure matematiche usate. Esistono anche meccanismi di apprendimento più vicini a quelli biologici in quanto non richiedono set di esempi precostituiti e utilizzano regole più simili a quelle biologiche. Queste reti non supervisionate sono meno adatte come classificatori in categorie precostituite, più adatte come scopritori di nuove categorie e caratteristiche (reti di Kohonen).

Un aspetto funzionale interessante si è manifestato quando qualcuno ha pensato di retro-connettere alcune connessioni, facendo sì che i valori di uscita di alcune unità rientrassero nelle unità d'ingresso o di strati comunque precedenti. Come detto per le reti neuronali biologiche, in queste condizioni avviene un grande cambiamento: la rete ora non si limita più a produrre segnali stabili in uscita per segnali stabili in ingresso, ma grazie alla retroazione che abbiamo descritto può anche produrre una sequenza (anche senza fine) di segnali in continuo cambiamento in funzione del succedersi dei suoi stati di attivazione interni: una sorta di memoria volatile della sequenza di attivazioni precedenti.

Memorie associative artificiali (e naturali)

Da tempo immemorabile negli archivi cartacei, e più recentemente nei calcolatori, si utilizza la *codifica posizionale*, vale a dire che a un certo indirizzo corrisponde l'informazione, ad esempio in una libreria, nel quinto scaffale, terzo ripiano, sesta posizione da sinistra si trova la Divina Commedia, o ancora in un calcolatore, nella casella di memoria 0110101, in codice binario, si trova il risultato della somma A+B. Per quanto efficace questo non è certo il modo in cui funziona una memoria biologica. La struttura che assomiglia di più ad una memoria biologica è una *memoria associativa*. Questa recupera le informazioni-ricordi non dall'indirizzo del ricordo come avviene nella memoria di un computer, ma da *una parte* del ricordo. Per capire come funziona possiamo tentare qui una spiegazione semplificata.

Abbiamo già paragonato la *rappresentazione* di un oggetto all'interno del sistema nervoso ad una scacchiera in cui ogni casella corrisponde a un neurone (bianco se attivato, nero se inattivato) e la distribuzione dei bianchi e neri definisce l'oggetto che è rappresentato, esattamente come un QR-code identifica oggetti e siti web (Fig. 60).

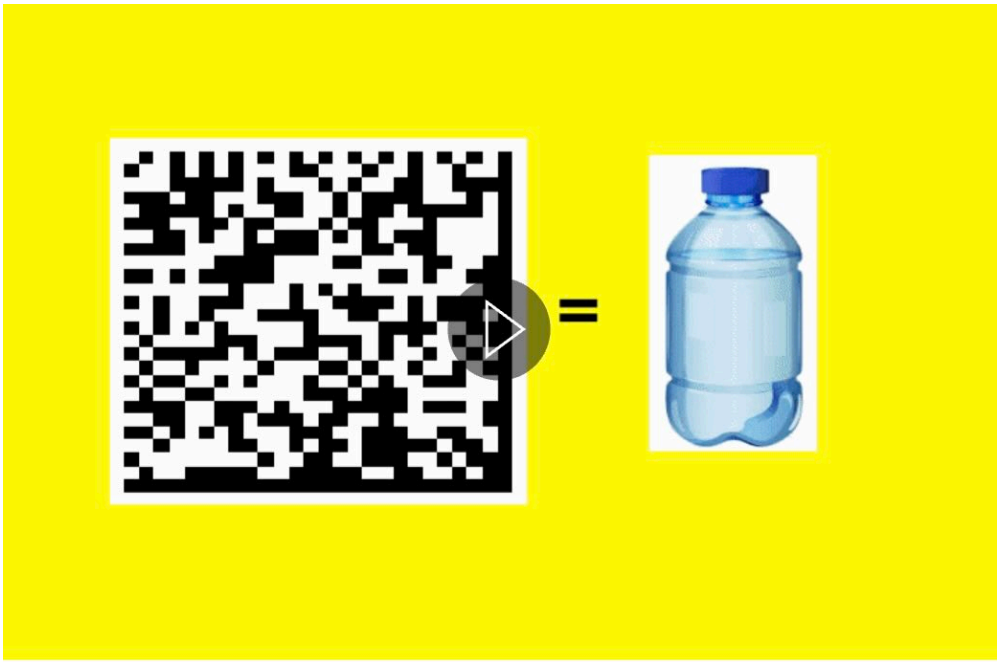


Fig. 60 (animata). QR code e corrispettiva rappresentazione.

La stessa scacchiera può rappresentare un numero enorme di oggetti in funzione delle possibili combinazioni di posizione e numero di bianchi e neri. In questa metafora le caselle bianche e nere attuano una codifica digitale binaria come gli 0 e 1 di un calcolatore, ma ovviamente anche una codifica analogica è possibile, utilizzando scale di grigi, da 0 a 10 o da 0 a 100, da attribuire a ciascuna casella.

Se ogni casella-neurone è unita a ogni altra con connessioni bidirezionali di opportuna potenza, ricavata dall'addestramento della rete, fornendo dall'esterno solo parti di tutta la scacchiera (anche in zone differenti) alle rispettive caselle-neuroni queste possono attivare e inibire tutte le altre fino a generare gli adatti bianchi e neri anche nelle caselle non definite, e riprodurre così la combinazione totale, ricostituendo di fatto la rappresentazione di dell'evento (una memoria).

In una memoria di questo tipo i ricordi non sono contenuti nelle caselle della scacchiera come nella memoria di un computer, ma sono contenuti *in stato potenziale* nei pesi di tutte le connessioni fra le caselle, e *rievocati* nelle caselle quando innescati da loro parti. È evidente che il fattore critico per una memoria di questo tipo è costituito dai pesi delle connessioni (che, ricordiamo, corrispondono alle forze delle sinapsi delle memorie neuronali), che vengono determinati dall'apprendimento genotipico (eredità genetica) e dall'apprendimento fenotipico individuale (esperienza). È importante comprendere che la stessa scacchiera può rappresentare anche oggetti simili ma non identici a quelli memorizzati (ad esempio un centauro), partendo da combinazioni innovative o fantastiche di innesco.

La topologia di queste reti associative artificiali non è definita in strati, anzi non è definita affatto poiché tipicamente ogni unità può essere connessa con tutte le altre, quindi non vengono definite unità d'ingresso e unità di uscita. In questo caso la rete è una nuvola dove tutte le unità possono ricevere dati in ingresso e fornire dati in uscita; ma, come abbiamo detto, è sufficiente che solo alcune unità vengano attivate (innesco) perché tutta la rete assuma una configurazione che rappresenta al meglio la configurazione globale solo parzialmente rappresentata dalla configurazione delle poche unità attivate. L'apprendimento di una memoria associativa avviene tramite una modifica progressiva delle connessioni tra le unità che la compongono in funzione della frequenza con cui si presenta ogni combinazione degli elementi fondamentali che costituiscono la rappresentazione da rievocare. Come abbiamo detto, ad apprendimento consolidato la memoria può ricostruire completamente una data combinazione anche attraverso la presentazione solo di una parte di questa, e la stessa memoria può ricostruire molte diverse combinazioni in funzione della configurazione delle parti-innesco che le vengono presentate.

Nella scacchiera *parti* della combinazione possono rappresentare *caratteristiche* dell'oggetto rappresentato globalmente. Ad es. la combinazione che globalmente rappresenta un cane può contenere parti che significano *quadrupede, peloso, marrone*, e quant'altro. Oggetti diversi possono condividere parti-caratteristiche in comune, differendo in quelle che li distinguono, ed una o più parti-caratteristiche possono funzionare da innesco per rievocare la combinazione-ricordo completa, che sarà tanto più univoca e specifica quanto più dettagliata e ampia è la chiave d'innesco. Ad esempio: quattro gambe e pelliccia folta e bianca = pecora; quattro gambe e pelo corto e maculato = cane dalmata; due gambe e penne = gallina; due belle gambe glabre =donna; quattro gambe e pelo corto e maculato e nome Jack = il *mio* cane.

Ma, un momento! E se una caratteristica non è rappresentata nella scacchiera? Se ad es. il nome Jack sta in un'altra scacchiera, in una scacchiera dei nomi? Nessun problema: le aree mnesiche del cervello (in pratica tutte le cortecce posteriori alla scissura di Rolando) non sono scacchiere distinte, ma un'unica grande scacchiera le cui parti possono entrare in gioco secondo il momento e la necessità. Una rappresentazione molto specifica, ad es. *mia nonna materna*, richiederà il coinvolgimento (bianchi-e-neri, attivazioni-e-inattivazioni) di un gran numero di caselle-neuroni in molte parti della scacchiera totale. Altro che *neurone della nonna* di Lettvin, che proponeva che *un singolo neurone* potesse rappresentare la memoria della *nonna* ed essere attivato solo quelle poche volte che mi ricordassi della nonna. Quanto più una rappresentazione è specifica tanti più neuroni saranno coinvolti. Nel senso che un singolo neurone può rispondere a stimoli molto diversi partecipando nello stesso gruppo che può rappresentare moltissime cose cambiando *la sua configurazione.* Insomma, come già detto, è la *configurazione* del gruppo neuronale che identifica una data memoria.

Questo modello suggerisce anche nuove interessanti interpretazioni per le cosiddette aree sensoriali primarie. Queste aree (poco primarie perché precedute da due interruzioni sinaptiche per il cosiddetto tatto protopatico e l'udito; tre per il tatto epicritico, la propriocezione e la vista), sono di fatto oltre che sensoriali, anche mnesiche. Si può supporre che le aree sensoriali primarie rappresentino caratteristiche di basso livello (poco specifiche) degli oggetti percepiti e, quando l'attivazione coinvolge anche le circostanti aree sensoriali secondarie, si aggiungano anche caratteristiche di più alto livello, e, se si uniscono rappresentazioni provenienti da altre modalità sensoriali (vista+udito+tatto), si abbia la rappresentazione di tutte le caratteristiche morfologiche e funzionali dell'oggetto che abbiamo definito *percezione*.

L'obiezione che si pone immediatamente a questo modello è: se fosse così, come si distinguerebbe una percezione della realtà da un ricordo o da un'immaginazione? Nel cap. 6 *Consapevolezza* abbiamo già ipotizzato che debbano esistere sistemi corticali (le cortecce prefrontali) che, pur inconsciamente, discriminano se l'attivazione proviene dall'ambiente (*percezione)* o dall'interno della rete corticale (*ricordo, immaginazione*). Questi sistemi non sarebbero attivi nel sogno, e mal funzionanti nelle psicosi dissociative, entrambe condizioni in cui l'attivazione dall'interno viene interpretata come realtà esterna.

Hubel e Wiesel nel 1981 hanno ricevuto il premio Nobel per la medicina per aver studiato meticolosamente il sistema corticale visivo nei macachi nel decennio precedente. Al tempo erano in gran vigore gli studi sull'attività dei singoli neuroni corticali per merito degli studi pionieristici di W. Mountcastle e G.F. Poggio e sicuramente dobbiamo a neurofisiologi come loro se abbiamo cominciato a capire qualcosa sul sistema visivo. Ma i tempi non erano maturi per una visione d'insieme, il connessionismo era sconosciuto. Hubel e Wiesel individuarono con estrema precisione colonne di neuroni della corteccia visiva rispondenti a particolari caratteristiche geometriche (righe verticali o inclinate, angoli o bordi contrastati) degli stimoli luminosi a cui le scimmie erano sottoposte, e molti si sentirono autorizzati a pensare che la percezione delle immagini complesse, ad esempio di un volto, consistesse nella sommatoria dell'attività di moltissimi neuroni ognuno dei quali partecipava

rispondendo a singoli piccoli elementi lineari componenti la figura. Negli anni successivi qualcuno si accorse che se la figura era complessa quei singoli neuroni non si attivavano *specificatamente solo ad una particolare inclinazione e lunghezza* dello stimolo luminoso, ma anche ad altre caratteristiche. Non è infatti pensabile che un neurone visivo resti inattivo per tutta la vita finché non viene stimolato da una specifica forma di una specifica dimensione e con uno specifico orientamento. Intanto però si procedeva nella mappatura della corteccia visiva, specificando prima 5 poi 7 aree con competenze funzionali caratteristiche (colore, forma, movimento ecc.), ancora ipotizzando che l'immagine complessa fosse la risultante della sommatoria dell'attività di quelle aree. Nel Cap. 19 abbiamo già discusso l'inconsistenza della mappatura delle cortecce sensoriali somatiche e visive, che è ancora dogmaticamente presente in tutti i trattati neurofisiologici *senza aver prodotto alcun risultato utile alla comprensione del funzionamento corticale.*

È stata solo la visione connessionista a portare un po' di luce in questo campo: è la plastica funzione della *rete nella sua totalità* a compiere il lavoro di classificazione, riconoscimento e generalizzazione della sensorialità. I singoli neuroni hanno attività molteplici in tutte le diverse occasioni perché interconnessi. *L'attività di ogni neurone dipende dall'attivazione sensoriale diretta proveniente dall'ambiente quanto dall'attività degli altri neuroni in rete con i quali di volta in volta interagisce.* Come abbiamo già detto, quando l'obiettivo è comprendere il funzionamento del sistema non ha senso studiare i singoli neuroni isolatamente con stimoli specifici.

In modo molto riduttivo immaginate una ragnatela: in ogni istante l'oscillazione di ogni nodo di questa nello spazio 3D dipende sia dall'impatto diretto di un insetto sul nodo stesso quanto dagli impatti contemporanei su altri nodi della rete, dallo stato di attivazione di tutta la rete. O ancora: in codici QR diversi un dato quadratino bianco o nero non ha un significato unico, ma dipende dalla combinazione di tutti gli altri quadratini bianchi e neri, e le combinazioni sono parecchi milioni. Il medesimo colore di questo quadratino (bianco o nero) *fa parte* della rappresentazione di un albero o di una casa o del suono di una campana che la configurazione di tutto il quadrato QR può assumere.

Algoritmi genetici (connessionismo evolutivo)

Il passo decisivo che ha permesso la piena accettazione dei modelli a reti neurali come modelli plausibili dei sistemi biologici è stato l'introduzione di *algoritmi genetici* che imitando i principali meccanismi evolutivi biologici evitano la necessità di costruire le reti specificando la topologia, il numero di unità, il tipo di funzioni e le modalità di connessioni e lasciano che siano i processi evolutivi a deciderne la costituzione in funzione del compito richiesto. Utilizzando questa metodologia lo sperimentatore si limita a definire la tipologia dei dati d'ingresso da classificare, e lascia che il processo evolutivo selezioni, da una moltitudine di reti inizialmente generate a caso, quelle poche che offrono i risultati migliori (all'inizio evolutivo potremmo dire i meno peggiori) per il compito richiesto. Riproducendo quest'ultime con variazioni casuali (mutazioni) nel loro piano costruttivo (la sequenza di 0 e 1 che nella simulazione definisce digitalmente il loro genoma artificiale) e ri-cimentando queste ultime con i compiti assegnati si selezionano progressivamente e automaticamente le reti con prestazioni ottimali (Fig. 61). Per i dettagli operativi rimandiamo al nostro precedente libro.

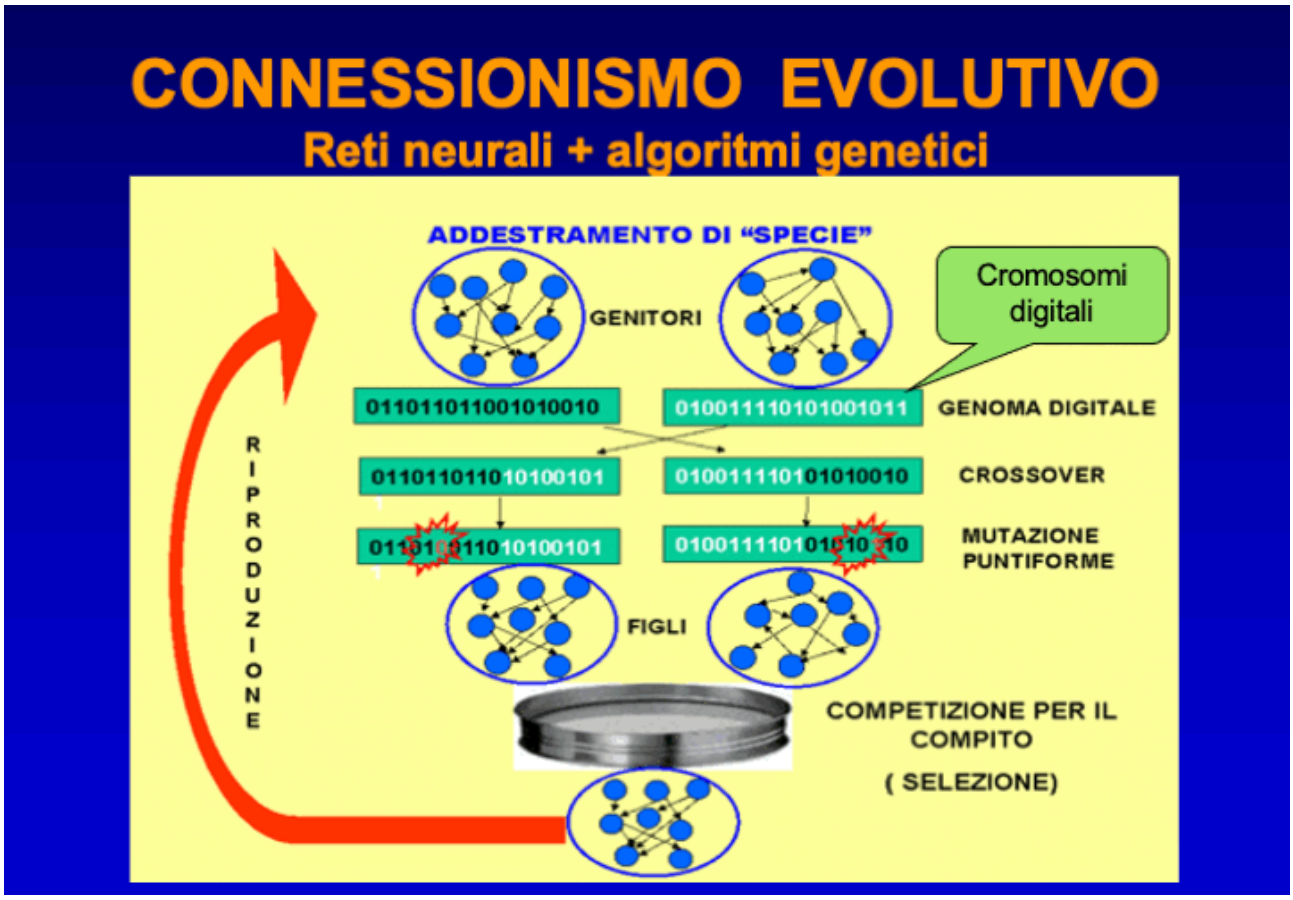


Fig. 61. Funzionamento degli algoritmi genetici con reti neurali artificiali.

In termini semplici l'obiettivo imposto dallo sperimentatore costituisce la *selezione artificiale* che ad ogni generazione permette la riproduzione solo alle reti neurali più adatte al compito in proporzione al rispettivo grado di efficienza. Esattamente in modo simile alla selezione artificiale di specie vegetali e animali in funzione dell'utilità che per noi ne deriva, con il vantaggio della velocità permessa dalle simulazioni informatiche. Come abbiamo già detto la differenza della selezione artificiale da quella naturale è solo nel fatto che in quella artificiale gli obiettivi sono scelti dallo sperimentatore; in quella naturale sono solo quelli di sopravvivenza finalizzata alla riproduzione.

Simulazione dei meccanismi di memoria con reti neurali artificiali

Abbiamo già ricordato i quattro principali meccanismi di memoria presenti nei sistemi biologici, che sono simulabili nei sistemi a reti neurali artificiali con i seguenti metodi:

1. memoria genotipica: sistemi di connessionismo evolutivo (algoritmi genetici);
2. memoria fenotipica: apprendimento hebbiano, regole delta, learning-by-doing (v. prossimo capitolo);

3. memoria di lavoro: connessioni rientranti, anche queste prodotte da algoritmi genetici;

4. memoria estesa: ambiente artificiale nel quale è immesso il sistema artificiale e che può mantenere tracce del comportamento (modificazioni ambientali) che possono essere ricorsivamente captate dal sistema stesso.

Negli esperimenti di connessionismo evolutivo abbiamo potuto osservare che la notevole potenza degli algoritmi genetici riesce ad implementare queste differenti modalità mnesiche velocemente e automaticamente producendo meccanismi efficientissimi nell'espletamento del compito desiderato. Ulteriore conferma sperimentale delle portentose capacità dei meccanismi evolutivi biologici.

Abbiamo affermato, e ne siamo convinti, che i modelli a reti neurali artificiali sviluppate con metodi di connessionismo evolutivo siano i migliori modelli, e forse gli unici attualmente, utili per comprendere il funzionamento dei sistemi nervosi, dai più semplici a quelli più evoluti.

Ma perché nella massa encefalica dei sistemi neuronali biologici si evidenzia una forma macroscopica molto articolata con nuclei e stratificazioni cellulari localmente differenti anche per variazioni microscopiche in funzione della loro localizzazione, e nei sistemi artificiali simulati su calcolatori, dove non c'è *nessuna forma,* la simulazione funziona ugualmente bene? Le spiegazioni sono principalmente due:

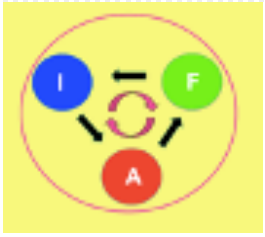
1) In generale i processi evolutivi biologici procedono utilizzando il piano strutturale esistente dell'individuo modificandolo e aggiungendo nuove strutture che si inseriscono con collegamenti retroattivi reali o virtuali, ma non procedono *cancellando e sostituendo*. Questo processo produce la complessità di *forme e funzioni* di tutte le strutture interne e l'aspetto esterno di tutte le specie, che costituisce poi la biodiversità ambientale.
La forma articolata e disomogenea della struttura encefalica è dovuta appunto ai processi evolutivi che implementano progressivamente strutture per funzioni superiori non cancellando quelle esistenti ma modificandole e quasi sempre asservendole alle nuove strutture adattandone la posizione e le connessioni in modo opportuno per la funzione che viene implementata.
"la funzione crea l'organo" è chiaro che ci deve essere prima un organo che produca una funzione, ma indubbiamente la forma di ogni struttura biologica è fortemente correlata alla sua funzione, e l'evoluzione genera variazioni di struttura a caso ma favorisce la riproduzione della migliore funzione, quindi la selezione della miglior struttura ne consegue. Possiamo correggere la frase di Lamarck come: "la funzione *migliora* l'organo".

2) la velocità di trasferimento dell'informazione nei sistemi artificiali è *elettronica* che è maggiore per diversi ordini di grandezza rispetto alle velocità neurologiche, e questo consente una simulazione *virtuale* dei tempi di ritardo necessari per molte funzioni (ricorrenze) che sono invece reali e intrinseci nei sistemi biologici, dove il trasferimento è lento perché *ionico* negli assoni, e *molecolare* negli spazi sinaptici e si manifesta anche con le diverse distanze (lunghezza degli assoni) tra neuroni interessati ai singoli processi.

Certo si potrebbe tentare una simulazione più *reale* del sistema nervoso, sempre con metodi di connessionismo evolutivo, imponendo una distribuzione spaziale 3D delle unità della rete e tempi di trasferimento dell'informazione molto più lenti e correlati alla distanza tra neuroni, ma a che pro? l'evoluzione lo ha già fatto e sicuramente molto meglio di quanto potremmo farlo noi. La simulazione *incorporea* che abbiamo sperimentato ci ha fatto capire come funziona il sistema nervoso non come è fatto, questo lo ha già descritto molto bene l'anatomia comparata e l'istologia.

Insistiamo, i tentativi di analisi morfologiche in vivo sempre più dettagliati (neuroimmagini funzionali) non potranno mai fornire indicazioni sul funzionamento del sistema. Lo abbiamo già detto, la distribuzione delle luci di una città dall'alto non ci dicono niente su lavoro che si svolge in questa!

28. LEARNING BY DOING
La tripletta associativa



Esistono genericamente due principali modalità di azione nell'ambiente: allontanamento e avvicinamento ad uno stimolo. Probabilmente la prima a comparire evolutivamente è stata l'evitamento (di pericoli), perché allontanare il corpo o parti di esso dai pericoli più frequenti per la specie è più importante e più facilmente ottenibile che definire e raggiungere specifiche direzioni o posizioni. Un riflesso midollare paucineuronale precablato alla nascita è sufficiente a compiere efficacemente e automaticamente un'azione di evitamento-difesa (retrazione dell'arto offeso). L'azione di avvicinamento viceversa, è più complessa, perché il raggiungimento dell'esatta posizione finale deve tenere conto non solo della posizione del bersaglio, eventualmente anche mobile, ma anche della posizione di partenza del corpo o dell'arto e la sua costituzione fisica, dimensione, peso e forze muscolari, che possono variare nel corso della singola vita. È necessario quindi un coordinamento sensori-motorio più evoluto e plastico (adattivo).

Si può pensare a due modi per imparare a muovere gli arti correttamente per una azione volontaria, per "imparare a fare".

Il primo che possiamo chiamare **retroattivo** consiste nel memorizzare la posizione iniziale degli arti, agire e poi valutare l'errore rispetto al risultato desiderato (le prime volte sicuramente grande). Successivamente modificare un parametro dell'azione (forza, velocità, arresto, di almeno uno degli effettori, anche scegliendolo a caso), ripetere l'azione e rivalutare l'errore per modificare nuovamente il parametro in modo da minimizzare l'errore (retroazione negativa). Se ripetendo più volte il ciclo, l'errore non si riduce cambiare parametro o effettore e ricominciare. A parte il tempo necessario per ripetere queste numerose operazioni, non è detto che il sistema sia equipaggiato per misurare l'errore con la precisione necessaria e questo ne può impedire l'apprendimento.

Il secondo metodo che possiamo chiamare **esplorativo** consiste invece nel memorizzare le condizioni iniziali, agire e poi memorizzare le condizioni finali senza considerare l'errore rispetto a quanto desiderato. In questo modo si apprende che con quell'azione e partendo da quelle condizioni iniziali si raggiunge quel risultato finale (che probabilmente non è quello desiderato). Si ripete la sequenza modificando qualche parametro dell'azione (anche a caso) e si memorizza il successivo risultato senza valutarne mai l'errore, ma in questo modo, ripetendo il ciclo, si costruisce abbastanza rapidamente un *repertorio di azioni* che portano a risultati definiti, anche se non desiderati. Si forma automaticamente una **mappa sensori-motoria** che risulterà utile per raggiungere qualunque obiettivo desiderato partendo da qualunque posizione, e questo metodo è appunto definito *learning by doing*.

Un ingegnere che costruisce bracci robotici, come quelli delle catene di montaggio delle automobili, utilizzerà probabilmente il metodo retroattivo definendo la traiettoria che deve compiere la *mano* del braccio meccanico e, avendo a disposizione la misura precisa degli angoli delle articolazioni e la misura precisa dell'errore, risolve con equazioni di cinematica inversa, la sequenza di forze da applicare alle articolazioni per compiere il movimento programmato correggendo la traiettoria retroattivamente. Comprendete che la programmazione diventa ancora più difficile se il braccio meccanico deve partire casualmente da posizioni diverse per raggiungere punti diversi.

Ma come fa un bambino di meno di due anni a prendere con successo una palla a portata di mano? il sistema nervoso non può certamente agire in questo modo, perché non ha una misura precisa degli angoli delle articolazioni, non può risolvere equazioni di alcun tipo, e soprattutto non ha la misura dell'errore tridimensionale della traiettoria che la mano compie per raggiungere il punto finale. Allora come fa? Il metodo più probabile è il secondo quello esplorativo (*learning-by-doing)* che possiamo descrivere come segue.

Il braccio del bambino (Fig. 62) è in posizione **I** (posizione Iniziale) e la palla è un poco distante, raggiungibile portando il braccio in posizione adatta. Se il bambino non ha ancora imparato il movimento esatto per raggiungere la palla, probabilmente compirà un'azione muscolare che porterà il suo braccio in una posizione **F** (posizione Finale effettivamente raggiunta) diversa dalla posizione desiderata, e quindi sbaglierà il bersaglio. Il sistema nervoso apprende automaticamente che con l'azione appena eseguita il braccio dalla posizione **I** ha raggiunto la posizione **F**, senza considerare di aver mancato il bersaglio se non per indurre il bambino a tentare un altro movimento approssimato verso l'obiettivo, e certamente senza alcun calcolo dell'errore effettuato. Probabilmente anche con un secondo movimento il bambino non raggiunge il bersaglio, ma il suo sistema nervoso comunque apprende che la nuova azione ha portato il braccio dalla nuova posizione iniziale **I'**, coincidente con la posizione **F** del movimento precedente, alla nuova posizione finale **F'** di questo secondo movimento. Ripetendo innumerevoli volte questa procedura (*motor babbling*) progressivamente il sistema sensori-motorio del bambino costruisce una mappa dettagliata dello spazio esplorabile dal suo braccio, utilizzando le esperienze dei movimenti effettuati nei tentativi di raggiungere la palla, che gli hanno insegnato quali posizioni dello spazio vengono raggiunte con le azioni muscolari effettuate nelle varie posizioni iniziali. Progressivamente il bambino diventa in grado di attivare in modo adeguato i suoi muscoli per raggiungere correttamente ogni punto di questo spazio da ogni punto di partenza. Avrà costruito **un'ampia memoria di triplette associative** "se parto da qui, con questa azione arrivo là" (e le note proprietà di generalizzazione delle reti neurali consentiranno al suo sistema nervoso di ricostruire le triplette non esplorate), cosicché quando la palla è là questa volta la prenderà.

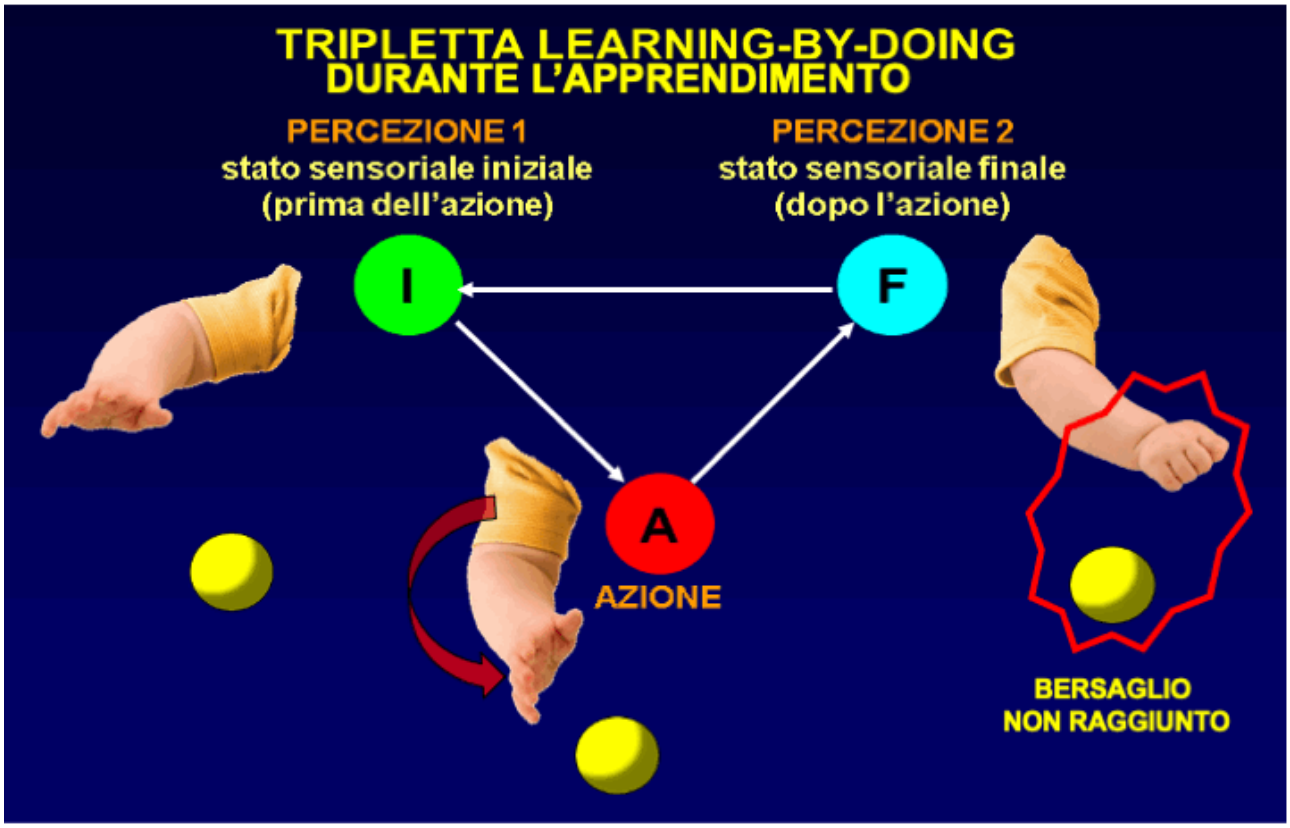


Fig. 62. Schema di tripletta motoria *learning-by-doing*. Anche i movimenti sbagliati contribuiscono alla mappatura sensori-motoria dello spazio e quindi all'apprendimento motorio.

Con questo metodo l'apprendimento è indipendente *dall'aver raggiunto o meno il bersaglio* in ogni singolo movimento eseguito. il sistema apprende le relazioni causa-effetto quindi, partendo dalla posizione *iniziale* ***I*** quale azione porta il braccio nella posizione raggiunta **F**, qualunque sia, non valuta l'errore rispetto al bersaglio, e così costruisce progressivamente un repertorio dettagliato di movimenti da utilizzare partendo da qualunque posizione **I** per raggiungere qualunque posizione **F**.

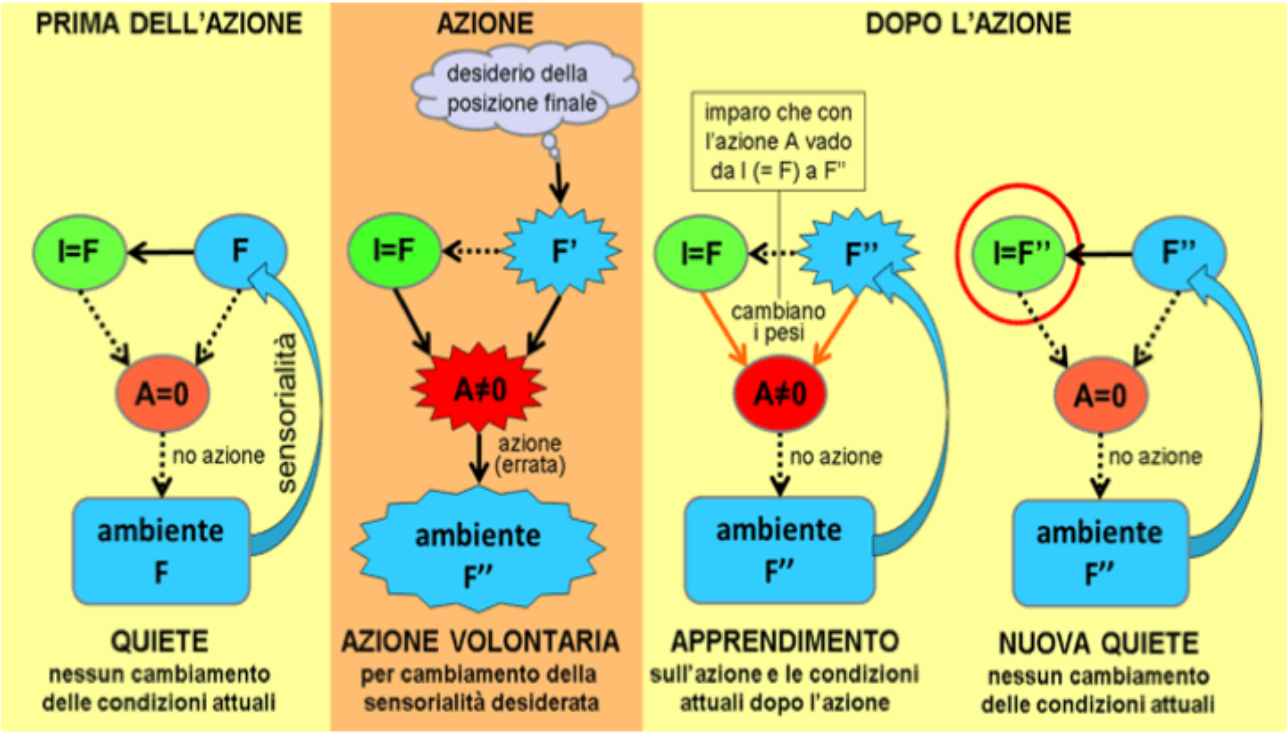


Fig. 63. Schema di azione volontaria e apprendimento motorio *learning-by-doing*. **I**: unità che codificano la posizione iniziale del braccio prima di un movimento. **F**: unità che codificano la posizione finale del braccio dopo il movimento. **A**: unità che codificano le attivazioni muscolari che producono i movimenti.

La descrizione del processo qui sotto è veramente difficile da seguire ma può essere riassunto così: **Il movimento che viene appreso è quello realmente effettuato, non quello desiderato.** L'individuo può comunque arrivare ad apprendere i movimenti desiderati, ripetendo i tentativi: ogni nuovo movimento, anche se ancora sbagliato, arricchisce la mappa sensori-motoria generale della rete, con la conseguenza che i movimenti effettuati a poco a poco si avvicinano a quelli desiderati (e quanto più vi si avvicinano tanto più anche l'apprendimento si avvicina a quello del movimento desiderato, diventando così sempre più efficiente), fino a coincidere.

Per descrivere il processo della tripletta associativa in termini neurofisiologici (Fig. 63) si può immaginare che in ogni istante lo stato sensoriale attuale, corrispondente alla posizione attuale del braccio, arrivi dalle vie sensoriali alle unità che codificano la posizione finale **F**, e che da queste venga continuamente copiato anche nelle unità che codificano la posizione iniziale **I**; e che la rete a tripletta nasca con connessioni, dai gruppi **I** e **F** al gruppo **A** codificante le attivazioni muscolari, geneticamente determinate in modo tale che quando le rappresentazioni sensoriali sui gruppi **I** e **F** coincidono, virgola nessuna attivazione (**A**=0) è generata dalle unità del gruppo **A**. In queste condizioni di riposo non è generato alcun movimento, non avviene alcun cambiamento sensoriale, e la posizione iniziale **I** e quella finale **F** continuano a coincidere (Fig. 63, parte sinistra, prima dell'azione). L'innesco dell'azione si produce quando tra le attivazioni delle unità **I** e **F** si verifica una differenza, perché una memoria o immaginazione sovrascrive nel gruppo **F** la rappresentazione dello stato sensoriale

attuale con la rappresentazione di un diverso stato sensoriale finale desiderato, corrispondente ad una diversa posizione finale-futura **F'. punto** La differenza ora esistente tra **I**=**F** ed **F'**, attraverso le connessioni da questi gruppi al gruppo **A**, genera in quest'ultimo attivazioni **A**≠0 che tramite le vie motorie raggiungono gli effettori muscolari, i quali producono un movimento che cambia la contestualità e quindi la sensorialità (Fig. 63, parte centrale, azione). Finché la rete non ha ancora appreso le attivazioni motorie atte a raggiungere la posizione finale desiderata, lo stato sensoriale **F"** effettivamente raggiunto dopo il movimento generalmente non coincide con quello desiderato **F'**. Tramite le vie sensoriali la nuova sensorialità **F''** è portata alle unità dello stato finale, dove (Fig. 63, dopo l'azione – apprendimento) prima di essere copiata nelle unità **I** può essere utilizzata per modificare i pesi delle connessioni da **I=F** ed **F''** ad **A** in modo tale che, qualora in futuro sui due gruppi sensoriali si verificassero le rappresentazioni attuali **F** e **F''** (n.b. non **F** e **F'**), siano nuovamente generati su **A** i valori **A**≠0 appena prodotti, *che l'esperienza appena effettuata ha mostrato essere quelli idonei a muoversi dallo stato iniziale **F** allo stato finale **F''*** (n.b. non **F'**), ossia dalla posizione iniziale **I=F** alla posizione finale reale **F''**. In altri termini, se in futuro il movimento desiderato dovesse essere proprio quello ora eseguito, la rete saprà come eseguirlo. Lo stato sensoriale desiderato **F'** è perduto senza altro effetto che aver generato il movimento effettuato (eventualmente errato).

È una strategia apparentemente strana, ma molto efficace, che difficilmente sarebbe venuta in mente ad un costruttore di robot. Non si corregge progressivamente la traiettoria per raggiungere un obiettivo desiderato, ma *si impara quale obiettivo viene raggiunto con la sequenza motoria appena effettuata*, senza valutare con quale errore si sia discostata dall'obiettivo prefissato. La differenza è sostanziale: tutti i dati sono disponibili al sistema (posizione iniziale, posizione reale raggiunta e azioni muscolari utilizzate), nessun calcolo per la correzione dell'errore viene fatto, ed il sistema automatico d'apprendimento, continuamente attivo, migliora progressivamente le azioni definendo sempre meglio la mappa delle posizioni raggiungibili partendo da qualunque posizione possibile. Questo metodo rende anche il sistema continuamente adattivo alle mutabili condizioni corporee (eventuali cambiamenti del braccio nel tempo: dimensioni, forza muscolare, elasticità, ecc.). Questa modalità, derivata dal *forward model* di Jordan e Rumelhart (1992) ben descritto da Lina Massone in una sua anticipazione del 1990, è stata da noi verificata positivamente con un modello a rete neurale (v. cap. 33 *ARM*) che costruisce molto bene la sua mappa sensori-motoria anche con un campionamento relativamente scarso (appena circa il 50% dei punti raggiungibili nel campionamento predeterminato e meno di 1/10000 dei movimenti effettuabili sul piano), cosicché anche movimenti mai precedentemente effettuati sono infine effettuati efficacemente. Si può dire che l'apprendimento delle traiettorie effettuate consente la produzione di traiettorie innovative, tanto più efficaci quante più sono le traiettorie apprese.

Per funzionare la rete a tripletta ha bisogno di retroazioni sensoriali al di fuori delle proprie connessioni rientranti, ha bisogno d'essere immersa in un ambiente dal quale ricava informazioni conseguenti il proprio comportamento.

D'altronde è per agire nell'ambiente che la tripletta è evolutivamente comparsa.

Nell'esempio su descritto l'unica informazione che viene utilizzata per proseguire i tentativi è quella di aver sbagliato il bersaglio, non la misura dell'errore.

Quando il bambino cresce un poco è in grado di prendere facilmente anche una palla che gli viene lanciata. Nel caso di un bersaglio mobile la situazione si complica notevolmente, e non per niente l'apprendimento richiede più ripetizioni e cervelli più maturi, ma in sostanza il meccanismo è analogo. In questo caso deve essere immaginata *la traiettoria più probabile* del bersaglio sulla base di memorie di situazioni analoghe osservate. Una rete neuronale ben addestrata può ricostruire la traiettoria

completa sulla base del campionamento di un solo tratto spazio-temporale di essa. Ovviamente la ricostruzione sarà tanto più fedele a quella reale quanto maggiore sarà il tratto campionato, e quanto più stabile sarà il campionamento temporale (un orologio interno torna utile se non indispensabile, e il cervelletto è probabilmente la struttura neuronale dedicata).

È interessante notare che nella previsione della traiettoria del bersaglio vengono incorporate caratteristiche implicite e costanti dell' ambiente come la gravità, e caratteristiche dell'oggetto come la massa e le resistenze aerodinamiche prodotte dalla sua forma e dal tratto di traiettoria compiuta, senza l'ombra di un calcolo. Abbiamo detto che per questo comportamento è necessario un cervello maturo ed evoluto che sappia estrarre dalla percezione dinamica contestuale tutte le caratteristiche utili alla previsione della traiettoria del bersaglio, insomma è necessaria una corteccia sensori motoria molto ben sviluppata. Non è un caso che la maggior parte degli animali predatori più in basso nella scala evolutiva cerebrale *insegua* la preda che fugge, ma non cerchi di *intercettarla* prevedendo una probabile posizione futura di questa, come invece fa un cacciatore umano con le sue frecce o il suo fucile, dove tra l'altro deve prevedere l'intersezione di due traiettorie, quella della preda e quella della freccia.

Generalizzazioni del modello learning-by-doing

Concatenamento di triplette

La tripletta descritta spiega il *movimento intenzionale*, come si traduce il desiderio di muovere un arto nelle contrazioni muscolari che realizzano il movimento desiderato. Il movimento intenzionale presuppone l'*immaginazione* dell'azione e delle sue conseguenze, scelte strategiche che, sulla base della situazione attuale-contingente, devono essere tradotte in scelte tattiche, che devono essere infine tradotte nella loro esecuzione motoria. La tripletta che abbiamo descritto è la tripletta *esecutrice*, situata al termine di una sequenza di processi decisionali eseguiti da una sequenza di triplette concatenate.

Il modello delle triplette concatenate può spiegare il processo che dall'intenzione-ideazione a livello superiore-strategico genera i movimenti atti a realizzarla; e la spiegazione che fornisce aiuta anche a comprendere meglio le funzioni di aree e sistemi cerebrali non ancora completamente compresi, come le aree premotorie ed i neuroni canonici e specchio (v. anche capitolo successivo).

Questo processo è prodotto dal concatenamento di triplette in successione in modo che l'elemento **A,** azione, di ciascuna tripletta costituisca anche l'elemento **F,** stato finale, della tripletta successiva (fig. 64), così che *l'azione* prodotta dalla tripletta superiore *costituisca la situazione finale desiderata* della tripletta inferiore: in pratica, *un'azione immaginata desiderata*.

La tripletta inferiore aggiunge, tramite le proprie unità **I,** ulteriori informazioni sulla situazione contingente attuale, e produce a sua volta sulle proprie unità **A** l'azione che, nella situazione attuale **I**, realizza il desiderio della tripletta superiore. In questo modo, nel passaggio successivo da tripletta a tripletta il desiderio ad alto livello prodotto dalla prima tripletta viene progressivamente tradotto nelle azioni che lo possono realizzare, fino all'ultima tripletta della catena, la tripletta esecutrice, che genera

ed invia ai muscoli gli opportuni comandi motori. In pratica, il salto dal desiderio ad alto livello alla sua realizzazione muscolare è suddiviso in una serie di passaggi di genericità decrescente e dettaglio crescente, ciascuno dei quali basato sulle informazioni sensoriali locali e attuali e sulle esperienze reali precedenti, memorizzate in modo implicito nei pesi delle connessioni di ciascuna tripletta al proprio livello. Solo nelle sue unità A che inviano connessioni *direttamente ai muscoli* la rappresentazione del movimento desiderato è in codifica motoria, idonea ad essere inviata alle fibrocellule muscolari senza ulteriori modificazioni.

Fig. 64. Concatenamento di triplette.

1a tripletta: ho fame (sensorialità, **I**), **non voglio più avere fame** (desiderio, **F**). Dalle esperienze passate la tripletta ha imparato che il comportamento per smettere di avere fame è mangiare (azione), e rappresenta quindi **mangiare** sulle proprie unità **A**.

2a tripletta: vedo **un frutto davanti a me** (sensorialità, **I**) e **mangiare** (desiderio, **F**). La tripletta combina i due elementi nell'azione **mangiare il frutto**, che rappresenta sulle proprie unità **A**.

3a tripletta: particolarmente interessante in quanto aggiunge un'informazione sensoriale che è di fatto una sensorialità indirizzata a fini motori: **quel frutto si può mangiare**. Questa informazione è contenuta in certi gruppi di neuroni, detti neuroni visuo-motori canonici, o brevemente canonici, che la restituiscono attivandosi alla percezione di oggetti compatibili con l'azione desiderata (ulteriori dettagli in seguito). Sugli elementi **quel frutto si può mangiare** (sensorialità arricchita a fini motori, **I**) e **mangiare il frutto** (desiderio, **F**) la tripletta conferma l'intenzione producendo sulle proprie unità **A** l'azione **mangiare il frutto**.

4a tripletta: altri neuroni canonici aggiungono un'altra informazione sensoriale indirizzata a fini motori: **quel frutto si può afferrare**. Per esperienza la tripletta *sa* (ha appreso) che per mangiare un frutto bisogna per prima cosa afferrarlo, e dagli elementi **quel frutto si può afferrare** (sensorialità arricchita, **I**) e **mangiare il frutto** (desiderio, **F**) produce sulle proprie unità **A** l'azione **afferrare il frutto**. Queste unità **A** sono neuroni canonici e neuroni specchio, dei quali discuteremo più avanti.

5a tripletta: **il frutto è davanti a me** (sensorialità, **I**) e **afferrare il frutto** (desiderio, **F**). La tripletta *sa* che per afferrare un oggetto davanti a me devo anzitutto estendere il braccio in avanti, e produce quindi sulle proprie unità **A** l'azione **estendere il braccio**. (In realtà queste unità **A** codificano anche se l'estensione del braccio è per afferrare o per spingere, per afferrare a piena mano o con la punta delle dita, per afferrare da sotto o da sopra o da lato, ecc.; ma qui trascuriamo per semplicità queste complicazioni).

6a tripletta: **Ho il braccio flesso** (sensorialità, **I**). La tripletta *sa* che **per portarlo in estensione** (desiderio, **F**) deve attivare i muscoli **estensori** (azione **A**), e conseguentemente genera sulle proprie unità **A** la combinazione di attivazioni che, inviata ai muscoli, produce quel movimento. Di tutta la catena, queste unità **A** sono le uniche ad essere **solo A** e non anche **F** per la tripletta successiva, e l'elemento azione rappresentato in esse, può essere considerato in codifica effettivamente motoria.

Naturalmente i passi che abbiamo prefigurato sono arbitrari: non pretendiamo di sostenere che nelle realtà biologiche le suddivisioni siano esattamente quelle descritte. Questa descrizione cerca solo di trasmettere il concetto che varie triplette possono concatenarsi in livelli discendenti via via più dettagliati per trasformare un'intenzione generica quale *voglio sentire la pancia piena* nelle contrazioni muscolari atte a realizzarla. Nella realtà è del tutto possibile che alcuni elementi che abbiamo considerato come separati siano in realtà funzionalmente più o meno uniti, oppure che, al contrario, vi siano altre triplette intermedie fra alcuni di questi passi, in particolare in quella che abbiamo sintetizzato come tripletta finale: basti considerare come "ho il braccio flesso" sia solo una minima parte delle informazioni iniziali necessarie al sistema motorio, altre essendo le informazioni sui livelli di contrazione muscolare già presenti prima del movimento, sullo stato dei muscoli antagonisti, sullo stato del resto del corpo, con particolare riferimento ai muscoli posturali che devono assecondare e/o controbilanciare il movimento desiderato, ecc. Abbiamo dettagliato essenzialmente i passi immediatamente successivi alla formulazione del desiderio ad alto livello perché riteniamo che questi possano aiutare a comprendere la funzione di aree e neuroni altrimenti equivoci o equivocabili come le aree premotorie ed i neuroni canonici e specchio.

Nella descrizione sintetica che abbiamo dato abbiamo anche considerato le azioni come attivazioni istantanee di unità **A**, laddove è invece ovvio che un'azione preveda una *sequenza* di attivazioni di muscoli agonisti, accessori ed antagonisti. Questa funzione di coordinamento in sequenza delle attivazioni muscolari è assolutamente implicita (non cosciente) e probabilmente attuata dal cervelletto, considerabile quindi come un servomeccanismo del sistema delle triplette.

È opportuno ripetere che, nella tripletta che abbiamo definito, ogni singolo elemento della tripletta (situazione iniziale, azione e conseguenze) può essere codificato dall'attivazione contemporanea di più aree neuronali diverse anche non solo corticali. Ad es. una data situazione sensoriale è generalmente costituita da un insieme di dati visivi, uditivi, propriocettivi, tattili, ecc., a livelli diversi d'integrazione sensoriale (midollare, troncoencefalico, sottocorticale, corticale). Insomma, *tripletta* non deve essere intesa come attivazione di tre aree, e men che meno come attivazione di due aree sensoriali e una motoria. Ciò che è importante per il funzionamento del sistema è che i tre elementi **prima dell'azione – azione – dopo l'azione** siano singolarmente codificati in gruppi neuronali interconnessi. La rete a tripletta può apprendere solo se i tre elementi sono tutti simultaneamente presenti sulle unità di input e di output.

Salendo di livello nella catena delle triplette si risale da conseguenze immediate dell'azione a conseguenze differite, e come si è detto non è più possibile una codifica motoria. Nella catena gli elementi **I** mantengono la loro funzione sensoriale, e le rappresentazioni in essi sono ovviamente in codifica sensoriale. Gli elementi **F** ed **A** attuano la trasformazione sensori-motoria dal desiderio (posto in codifica sensoriale) all'esecuzione motoria, e costituiscono quindi una catena sensori-motoria. Salvo per le unità **A** dell'ultima tripletta, *in tutta la catena sensori-motoria le rappresentazioni sono in codifica sensoriale*, poiché le unità **F**-**A** apprendono gli effetti delle azioni (*learning-by-doing*) dai feedback che a loro pervengono dalle vie sensoriali, e quindi necessariamente in codifica sensoriale.

Correlati anatomici

Riteniamo che il desiderio ad alto livello si generi nelle aree prefrontali, e che le unità **F** della prima tripletta siano quindi localizzate a livello prefrontale.

Le unità **F**-**A** delle triplette successive sono verosimilmente costituite dai neuroni delle aree premotorie, in senso rostro-caudale, fino alle unità **F**-**A** dell'ultima tripletta corticale (estendere il braccio, più precisamente *desiderio di sentire il braccio esteso*), che possono corrispondere all'area motoria M1.

Le unità **A** dell'ultima tripletta, che inviano i comandi motori ai muscoli, corrispondono senz'altro ai motoneuroni alfa del midollo spinale.

È da considerare che tutte le unità delle triplette intermedie devono corrispondere a neuroni post-sinaptici delle interruzioni sinaptiche presenti lungo le vie sensoriali (unità **I**) e lungo le vie motorie, piramidali ed extrapiramidali (unità **F**-**A**). Probabilmente in pratica ogni struttura di sostanza grigia del midollo, troncoencefalo ed encefalo è sede di almeno un elemento di una tripletta. In questo senso la via piramidale, con il suo minor numero d'interruzioni sinaptiche rispetto alle vie extrapiramidali, avrà un minor numero di triplette fra desiderio ed azione, e questo è comprensibile considerando che le

azioni di pertinenza del sistema piramidale (manipolazione e linguaggio) non richiedono un'integrazione così intensa con altre parti del corpo quanto quelle del sistema extrapiramidale. Si può parlare e manipolare stando fermi e seduti!

Triplette virtuali e previsione

Fino a questo punto abbiamo considerato la rete a tripletta solo nella sua funzione motoria (la capacità di generare, date una situazione iniziale **I** ed una situazione finale desiderata **F**, l'azione **A** atta a passare dalla prima alla seconda); e nell'ambito di questa abbiamo considerato solo il caso di un'azione da effettuare nella situazione reale contestuale. In questo caso la situazione iniziale **I** è fornita alla rete dalle vie sensoriali, mentre la situazione finale desiderata **F** è *immaginaria*, prodotta da altri sistemi (segnatamente le aree prefrontali o le triplette soprastanti nella catena) e fornita alle unità **F** della rete come rappresentazione sensoriale della realtà immaginata-desiderata. Insomma le unità **F** *apprendono* dai feedback sensoriali, ma sono attivabili anche da altre strutture, con rappresentazioni diverse da quelle portate dalle vie sensoriali ossia *immaginate/ricordate.*

Nulla vieta che, oltre alle unità **F**, anche le unità **I** ed **A** possano ricevere rappresentazioni immaginate prodotte da strutture mnesiche o immaginative esterne alla tripletta; e che le attivazioni delle unità **A** possano essere inviate ad altre vie che quelle motorie, rimanendo così *azioni immaginate*. In questo caso tutti i tre elementi della tripletta sarebbero immaginari: una **tripletta interamente virtuale**, con vantaggi rilevanti che descriviamo di seguito.

Nella sua funzione motoria la rete è comparabile ad una rete forward, con le unità **I** ed **F** a costituire lo strato di input, le unità **A** lo strato di output, e le connessioni in avanti dalle unità **I** ed **F** alle unità **A**. Ma la rete a tripletta è in realtà una memoria associativa, in cui ciascuno dei tre elementi **I**, **F** ed **A** invia e riceve connessioni dagli altri due, sicché dati *due qualsiasi* dei tre elementi la rete può generare il terzo elemento. Quindi se le unità **I** ricevono la rappresentazione di una sensorialità, reale o immaginaria, e le unità **A** la rappresentazione di un'azione immaginaria, sulle unità **F** compare la rappresentazione della situazione finale conseguente all'azione immaginata **A** nella situazione **I**. Questa è di fatto una *previsione*: la tripletta prevede il risultato dell'azione **A** nella situazione **I**. Poiché la rete a tripletta apprende per esperienza, le sue previsioni sono in effetti ricordi; ma le proprietà generalizzatrici delle reti neurali estendono la copertura e tappano le falle, come avviene per la rete a tripletta motoria nella sua mappatura sensori-motoria dell'esperimento ARM (cap. 33), vedi avanti.

Ben si comprende il notevole vantaggio di un'organizzazione neuronale che effettua previsioni. L'individuo non deve più procedere fisicamente per prove ed errori, e pagarne le conseguenze, ma può immaginare e progettare un comportamento innovativo con le sue probabili conseguenze sensoriali *prima* di effettuarlo fisicamente. Questo sistema libera l'individuo dalla reazione riflessa; consente d'immaginare situazioni sensoriali non contestuali, e quindi di classificare il tempo in passato, presente e futuro. La distinzione tra il presente percepito ed il futuro immaginato può essere automatica e implicita nel dirigere un'azione già sperimentata, ma **diventa cosciente se l'attenzione è rivolta alla percezione di questa distinzione,** particolarmente se l'azione è innovativa (mai sperimentata).

Queste triplette virtuali assumono funzioni prettamente cognitive, ed è pertanto pensabile che costituiscano la parte più alta delle catene di triplette, o addirittura ne siano l'inizio, nelle aree prefrontali. Questa considerazione suggerisce anche un indizio su come e perché una tale organizzazione possa essersi evoluta. Nella zona alta della catena il feedback sensoriale può essere anche notevolmente differito nel tempo rispetto alla situazione iniziale ed all'azione; tuttavia abbiamo detto che l'apprendimento di una tripletta può avvenire solo se tutti gli elementi della tripletta sono simultaneamente presenti. Se il feedback sulla situazione finale è differito rispetto alla situazione iniziale ed all'azione occorre allora la compartecipazione di meccanismi di memoria in grado di rievocare, nel momento in cui arriva il feedback della situazione finale, anche la situazione iniziale precedente e l'azione effettuata; solo in questo modo l'associazione fra i tre elementi della tripletta può essere stabilita, e la relazione di causa–effetto tra l'azione e la situazione finale può essere appresa. S'immagini, ad esempio, una rete che si trovi in stato iniziale di fame e in presenza di un frutto sconosciuto: lo stato iniziale richiede di mangiare il frutto, puntando ad ottenere uno stato di benessere e pancia piena; ma, dopo alcune ore, il risultato è invece una colica intestinale. Una tale rete sarebbe potenzialmente in grado di associare la colica all'aver mangiato quel frutto, a patto che nel momento d'arrivo del feedback sensoriale circa lo stato finale (la colica) siano rievocabili anche la situazione prima dell'azione (fame con assenza della colica, e presenza del frutto) e l'azione effettuata (mangiare il frutto). Questo è possibile se le unità **I** sono attivabili non solo dalle vie sensoriali, e le unità **A** non solo dalle unità **I** ed **F**, ma tutte sono attivabili anche da unità esterne con funzioni di memoria. Questa può essere stata la base di uno svincolamento progressivo delle unità delle triplette superiori dal collegamento esclusivo con le vie sensoriali e motorie, e dell'aggiunta di collegamenti con unità capaci di attivare la tripletta con rappresentazioni differenti dalla realtà sensoriale contestuale e da un'azione da eseguire realmente. In ultima analisi queste potrebbero non essere più solo reti che apprendono facendo, ma reti che apprendono anche immaginando, ricordando, e scovando relazioni e nessi causali non contestuali. Potremmo chiamarle reti **learning-by-thinking**.

29. NEURONI CANONICI E NEURONI A SPECCHIO

Nel capitolo precedente abbiamo accennato all'esistenza, nelle aree premotorie, di neuroni dalle proprietà particolari, detti *neuroni canonici* e *neuroni specchio*, che abbiamo anche collocato nella catena di triplette che proponiamo come modello del movimento volontario. In questo capitolo desideriamo spendere qualche parola di più su questi neuroni in considerazione della sovraesposizione mediatica di cui sono oggetto e della loro complessità, che espone a ipotesi erronee circa le loro funzioni.

Nell'area premotoria del macaco, ed in particolare nella parte detta F5 (corrispondente all'area 44 di Brodmann nell'uomo), è stata dimostrata la presenza di:

1. neuroni attivi quando l'individuo **percepisce un oggetto su cui può compiere un'azione**;

2. neuroni attivi quando l'individuo **percepisce un oggetto su cui può compiere un'azione**, ed anche quando **esegue quella azione** (n.b.: percezione di un oggetto, non di una azione, cfr. neuroni 4 e 5);

3. neuroni attivi **solo** quando l'individuo **compie l'azione**;

4. neuroni attivi quando l'individuo **compie l'azione**, ed **anche se vede sé stesso** compierla, pur senza compierla muscolarmente (direte: com'è possibile? Si mostra all'individuo un video nel quale un braccio compie l'azione come se fosse collegato alla sua spalla, mentre il suo braccio non si muove);

5. neuroni attivi quando l'individuo **compie l'azione**, ed **anche se percepisce altri** compierla (ad es. anche all'udire il rumore dello strappare un foglio di carta).

I neuroni 1) e 2) sono i *neuroni canonici*; i 4) e 5) i *neuroni specchio*. I neuroni del tipo 3) non sono distinguibili da neuroni semplicemente motori, e pertanto non hanno destato scalpore, anche se si può ritenere che abbiano lo stesso rango e dignità funzionale degli altri, considerando che sono nella stessa area F5. Invece i neuroni canonici (circa l'80% dei neuroni dell'area F5) ed i neuroni specchio (20%) hanno fatto scalpore, per le loro proprietà sensoriali là dove ci si aspettava solo proprietà motorie. Ciò però ha fatto focalizzare l'attenzione sulle proprietà sensoriali a detrimento di quelle motorie, e questo – unitamente al fatto che la neuropsicologia classica, diversamente da quella connessionista, considera le funzioni senza considerare anche come vengano apprese – ha portato a formulare ipotesi via via più fantasiose e infondate sulla funzione di questi neuroni. Le menzioniamo in ordine d'apparizione:

1. i neuroni specchio servono ad apprendere per imitazione (ipotesi ancora plausibile).

2. servono per comprendere le azioni altrui, e quindi per la *teoria della mente*.

3. servono per comprendere le emozioni altrui, e quindi empatizzare con gli altri, e potrebbero essere coinvolti in condizioni di ridotta empatia come l'autismo.

Quest'ultima è ridicola. Per comprendere le emozioni altrui ed empatizzare con gli altri servono neuroni sensoriali capaci di leggere le emozioni, in particolare la mimica facciale nei primati, non neuroni sensori-motori che si attivano ai gesti transitivi, ossia alle azioni che utilizzano oggetti. Ed infatti, ad onta di tutte le ricerche effettuate, *non è emersa una sola evidenza a sostegno di questa ipotesi sull'empatia nell'uomo*, mentre sono emersi vari indizi contrari. Ad es., nessuna disfunzione dell'empatia si riscontra nelle lesioni delle aree ritenute sede dei neuroni specchio nell'uomo (Decety J., *Emotion Review*, 2011). Ed anche per le supposte funzioni di comprensione delle azioni altrui, nella scimmia non vi è nessuna evidenza che i neuroni specchio forniscano una base per la comprensione delle azioni, e nell'uomo le evidenze sono fortemente *contro* questa teoria (Hickok G., *Journal of Cognitive Nurosciences*, 2008).

Al contrario, le proprietà sensoriali dei neuroni canonici e specchio sono pienamente spiegati dalle modalità di apprendimento connessionistico e dal modello learning-by-doing. In questo modello il fatto che i neuroni siano attivabili da informazioni sensoriali è conseguenza automatica ed inevitabile del fatto che essi apprendono da rappresentazioni (delle situazioni, delle azioni e delle loro conseguenze) ad essi veicolate dai feedback sensoriali e pertanto in codifica sensoriale. Questi neuroni apprendono a percepire e a comunicare tra loro in codifica sensoriale, che è la codifica utilizzata in tutto il sistema nervoso a parte i livelli finali che precedono immediatamente l'esecuzione motoria, e non dovremmo stupirci di questo.

Insomma, **i neuroni canonici e specchio servono per agire intenzionalmente**, non per empatizzare con gli altri. Tutti i riscontri sperimentali supportano questo modello. Ipotesi come quella dell'empatia ostacolano la comprensione sia dell'empatia (e dell'autismo) che del movimento. Comprendiamo che queste ipotesi abbiano fornito mezzi di sussistenza a generazioni di ricercatori, ma pensiamo che il vaso sia ora colmo. Lo spazio di ricerca sui neuroni canonici e specchio nel campo del movimento volontario è abbastanza vasto da non richiedere agganci fantasiosi a temi di moda come l'autismo.

Un ultimo argomento che può valer la pena discutere in tema di movimento volontario è il ruolo dei neuroni dell'area M1. Questa è l'ultima area motoria corticale precedente il passaggio dei comandi motori alle strutture ed alle vie sottocorticali, anatomicamente situata immediatamente davanti alla scissura di Rolando e funzionalmente collocata all'ultimo anello della catena antero-posteriore che va dalle aree prefrontali alle aree premotorie ed infine all'area appunto M1.

Nel modello che proponiamo anche questi neuroni fanno parte della catena di triplette, ben prima dell'ultima tripletta esecutrice, e pertanto anch'essi *codificano <u>sensazioni desiderate</u> conseguenti ai movimenti da effettuare* piuttosto che, come finora ritenuto, azioni motorie. Riteniamo che la loro differenza rispetto ai livelli-triplette precedenti della catena sia che essi codificano le sensazioni desiderate dei propri arti, le future sensazioni propriocettive conseguenti al movimento che si sta per

effettuare. Questa codifica, trasmessa alle strutture paleoencefaliche sottostanti, provoca il movimento idoneo ad ottenere tali sensazioni.

In altri termini, dalle cortecce prefrontali alla scissura di Rolando, tutti i neuroni codificherebbero *immaginazioni di azioni* (e più estesamente di eventi a cui conseguono effetti) *attraverso una rappresentazione sensoriale di quelle azioni ed eventi*, con una progressione del seguente tipo:

1. aree prefrontali = rappresentazione della sensorialità di nessi causali, relazioni fra azioni (cause) ed effetti.

2. aree premotorie = rappresentazione della sensorialità di azioni in generale, anche altrui (neuroni specchio).

3. area M1 = rappresentazione della sensorialità futura conseguente ad *immediati propri* movimenti intenzionali.

Il fatto che i neuroni in M1 siano strettamente connessi con i vicini neuroni sensoriali in S1 può confermare che, per agire correttamente, oltre a rappresentare una sensorialità muscolare ed articolare *futura* sia necessario conoscere anche la sensorialità muscolare ed articolare *attuale*. Per spiegare più concretamente: per prendere una mela sull'albero M1 codifica "vorrei sentire il mio braccio teso in alto che tocca la mela", mentre S1 codifica "ora sento il braccio in basso sul fianco e la mano vuota", ed è la differenza tra queste rappresentazioni sensoriali (percezione attuale e desiderio) che genera nelle strutture paleoencefaliche l'attivazione neurale che produce l'azione da compiere.

Ci rendiamo conto che il modello che proponiamo rappresenta uno stravolgimento della neurofisiologia corrente. Ma questa continua a separare aree arbitrariamente definite solo motorie da altre più propriamente definite sensoriali, e si accanisce nel tentativo di renderle topograficamente più definite con mappe separate disegnate con omuncoli fantasiosi di cui non si vede la motivazione funzionale. Come abbiamo già detto che senso ha, evolutivamente parlando, duplicare a livello corticale controlli motori già presenti (a parte manipolazione e linguaggio) e perfettamente operanti a livello paleoencefalico? È più logico pensare che alcune strutture corticali gestiscano questi controllori sottostanti utilizzando informazioni sensoriali di livello superiore.

La critica che ci viene abitualmente sollevata è: "come mai allora una lesione nell'area corticale motoria M1 provoca paralisi? Il sistema sottostante dovrebbe poter muovere automaticamente l'arto di fronte ad uno stimolo consistente". La risposta è: nell'uomo le strutture motorie paleoencefaliche sono gerarchicamente molto controllate dalle aree motorie e premotorie corticali, per cui un'improvvisa mancanza di quest'ultime (diaschisi) scompensa gravemente il sistema. Ma in animali con corteccia motoria meno evoluta, come canidi e roditori, e soprattutto con meno corteccia prefrontale, in conseguenza di lesioni di M1 non si osserva una paralisi completa ed il recupero postlesionale è rapido e quasi totale. Anche nell'uomo, se la lesione di M1 non è troppo estesa, si nota una *paralisi dei movimenti volontari* prevalentemente manipolatori e linguistici, ma permane una notevole capacità motoria riflessa, tanto più efficace quanto più il movimento riguarda strutture muscolari prossimali o assiali, con funzioni antigravitarie.

In conclusione a questo capitolo desideriamo menzionare l'unico studio fino ad ora che ha dimostrato l'esistenza di neuroni specchio nell'uomo (Mukamel et al. 2010). I ricercatori hanno misurato le attività di 1177 neuroni (o piccoli gruppi di neuroni, che d'ora in poi equipareremo comunque per semplicità ai singoli neuroni) nelle aree premotorie e in aree della corteccia emotiva di 21 soggetti ai quali hanno fatto vedere ed eseguire due azioni transitive (prendere un boccale con il palmo della mano o con la punta delle dita) e due azioni espressive (sorriso o spavento), con i seguenti risultati:

- ben il 55% dei neuroni esaminati reagiva (aumentando o diminuendo la propria attività basale) ad almeno una delle quattro azioni.

  Di questo 55%:

- il 73% reagiva solo all'*esecuzione* o solo alla *vista* di una delle quattro azioni, comportandosi quindi come classici neuroni motori o sensoriali.

- il 14% reagiva sia *all'esecuzione che alla vista* di una delle quattro azioni, comportandosi quindi come i noti neuroni specchio.

- alcuni di questi rispondevano però in modo opposto *all'esecuzione ed alla vista della loro azione*, attivandosi all'esecuzione ed inibendosi alla vista, o viceversa.

- il 13% reagiva all'*esecuzione di un'azione ed alla vista di un'altra*, reagendo così a due azioni di tipo diverso – una transitiva, l'altra espressiva – o addirittura a *due azioni opposte dello stesso tipo*, es. sorriso e spavento.

- quest'ultimi non reagivano con risposte opposte alle due azioni a cui erano sensibili (attivazione ad una e inibizione all'altra), ma con *lo stesso tipo di risposta*.

- il 12% dei neuroni delle aree motorie rispondeva solo alla *vista* di un'azione, non ad un'esecuzione (e, di questi, il 53% solo alla vista di un'espressione, il 6% alla vista di un'espressione ed a quella di una presa).

- il 20% dei neuroni delle aree emotive rispondeva *ad almeno una azione e a nessuna espressione* (e, di questi, il 50% solo all'*esecuzione* di una azione, il 37% solo alla sua vista, il 12% alla vista ed all'esecuzione, l'1% alla vista ed all'esecuzione di *ambedue* le azioni).

E questo, sottolineiamo, già solo dal primo e unico studio di questo tipo effettuato nell'uomo. Non ci sembra vi possa essere dimostrazione migliore delle affermazioni che abbiamo già fatto in questo libro:

- La divisione fra neuroni sensitivi e neuroni motori a livello encefalico è fallace, **tutti comunicano in codifica sensoriale**. A livello corticale al di sopra delle aree sensoriali primarie la maggior parte delle informazioni sensoriali arriva probabilmente a tutti o quasi tutti i neuroni. Non ci si deve stupire che quasi tutti i neuroni, anche quelli precedentemente ritenuti motori, reagiscano anche ad informazioni sensoriali; e, considerando che le informazioni sensoriali dai sensi a distanza riguardano

soprattutto l'ambiente esterno, non ci si deve stupire che reagiscano anche ad informazioni che concernono l'ambiente o altri individui. Non dovremmo stupirci che esistano neuroni canonici e specchio, dovremmo stupirci se non esistessero. Il fatto che neuroni anteriori reagiscano a stimolazioni sensoriali contenenti informazioni motorie attuali o potenziali (neuroni canonici) ci dice solo che l'*argomento* di cui i neuroni anteriori comunicano fra loro è quello delle azioni e di eventi in generale non solo delle azioni che stiamo per compiere.

- La risposta di un neurone (attivazione o inibizione) ha significato solo come parte della combinazione di risposte della rete neuronale a cui quel neurone appartiene. Come la casella bianca o nera di un QR code nella sua matrice. Una medesima risposta, che sia attivazione o inibizione, cambia significato in funzione della risposta degli altri neuroni della rete.

- I neuroni inibiti contano quanto quelli attivati in ogni rappresentazione.

- Tentare di comprendere la funzione di un neurone solo dalle sue risposte è fallimentare, quando non anche fuorviante. Il concetto stesso *funzione di un neurone* o di un *tipo* di neuroni è sbagliato. La *funzione* è di *una rete* di neuroni.

Ribadiamo pertanto fermamente che gli studi sul singolo neurone servono solo per comprenderne le risposte elettrochimiche intrinseche, non certamente per comprenderne la funzione, che è proprietà di una rete di neuroni che interagisce con l'ambiente.

Letture consigliate su questo capitolo

Borg, E. (2007). *If mirror neurons are the answer, what was the question?* Journal of Consciousness Studies*, 14*(8), 5-19.

Caggiano, V., Fogassi, L., Rizzolatti, G., Thier, P., & Casile, A. (2009). *Mirror neurons differentially encode the peripersonal and extrapersonal space of monkeys.* Science*,* 324(5925), 403-406.

Caggiano, V., Fogassi, L., Rizzolatti, G., Pomper, J. K., Thier, P., Giese, M. A., & Casile, A. (2011). *View-based encoding of actions in mirror neurons of area f5 in macaque premotor cortex.* Current Biology*,* 21*(*2), 144-148.

Casati, R., & Pignocchi, A. (2007). *Mirror and canonical neurons are not constitutive of aesthetic response.* Trends in Cognitive Sciences*,* 11(10), 410.

Casile, A., Caggiano, V., & Ferrari, P. F. (2011). *The mirror neuron system: a fresh view*. The neuroscientist*, 17*(5), 524-538.

Casile, A. (2013). *Mirror neurons (and beyond) in the macaque brain: an overview of 20 years of research.* Neuroscience letters*,* 540, 3-14.

Decety, J. (2011). *Dissecting the neural mechanisms mediating empathy.* Emotion review*,* 3*(*1), 92-108.

Dinstein, I., Thomas, C., Humphreys, K., Minshew, N., Behrmann, M., & Heeger, D. J. (2010). *Normal movement selectivity in autism*. Neuron*,* 66*(*3), 461-469.

Heyes, C. (2010). *Mesmerising mirror neurons*. Neuroimage*,* 51(2), 789-791.

Hickok, G. (2009). *Eight problems for the mirror neuron theory of action understanding in monkeys and humans*. Journal of cognitive neuroscience*,* 21*(*7), 1229-1243.

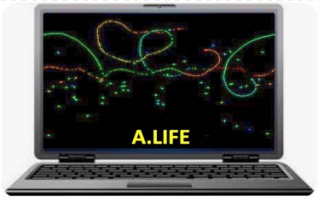
Keysers, C. (2009). *Mirror neurons*. Current Biology*,* 19(21), R971-R973.

Lamm, C., Decety, J., & Singer, T. (2011). *Meta-analytic evidence for common and distinct neural networks associated with directly experienced pain and empathy for pain*. Neuroimage*,* 54(3), 2492-2502.

Mukamel, R., Ekstrom, A. D., Kaplan, J., Iacoboni, M., & Fried, I. (2010). *Single-neuron responses in humans during execution and observation of actions.* Current biology*,* 20(8), 750-756.

Rizzolatti G., Craighero L. (2004). *The mirror-neuron system*. Annual Rev Neurosci, 27:169-92.

30. SPERIMENTAZIONI CON RETI NEURALI



Nei capitoli successivi è indispensabile avere un lettore multimediale perché le immagini dinamiche sono molto utili per comprendere la potenzialità di questi sistemi simulativi

Come già accennato nel cap. 27 *Il Connessionismo*, la plausibilità biologica dei modelli con reti neurali artificiali può essere ulteriormente aumentata lasciando che le reti vengano modellate da algoritmi genetici (Goldberg, 1989; Schaffer, Whitley 1992). Questa metodologia, definita *connessionismo evolutivo*, consiste nell'applicare i principali meccanismi evolutivi darwiniani a sistemi di reti neurali artificiali immesse in ambienti anch'essi artificiali che promuovano la comparsa di comportamenti utili alla *sopravvivenza* delle reti stesse. Questa metodologia si è dimostrata estremamente potente, efficace e compatibile con la realtà biologica, e qui di seguito illustriamo sinteticamente e prevalentemente con immagini e filmati gli esperimenti che abbiamo effettuato nel corso degli ultimi 30 anni. L'utilizzo di questi modelli, che abbiamo definito *comportamentismo artificiale*, consente il controllo di tutte le variabili che vengono immesse nel modello in simulazione e anche l'osservazione dell'attività delle reti neurali che ne gestiscono il comportamento. Non siamo più di fronte ad una scatola nera, possiamo osservare nel tempo tutti gli stati di attivazione delle unità neurali, sia quelle in relazione con l'ambiente (input e output), sia quelle interne (nascoste). Il problema diventa piuttosto trovare un significato a noi comprensibile di tali stati. In questo caso la scatola è trasparente; siamo noi ad avere gli occhiali scuri (Fig. 65).

Per una descrizione più dettagliata di questi esperimenti e della costituzione delle reti neurali utilizzate rimandiamo al nostro precedente libro *Coscienza Artificiale* 2009.

Il primo modello, **ALIFE** (vita artificiale), simula un semplice ecosistema dove le reti neurali (d'ora in poi *agenti*) che vi sono immesse, sottoposte ad evoluzione, sviluppano una organizzazione sensori-motoria che manifesta una strategia efficace per percepire e raggiungere le fonti di energia necessaria (cibi) per muoversi e riprodursi.

Nel secondo modello, **GAZE** (sguardo), una popolazione di reti neurali preposta al controllo di un modello testa–occhi di tipo umano che deve inseguire bersagli in movimento, evolve rapidamente e manifesta un controllo sensori-motorio binoculare molto simile a quello umano.

Il terzo modello, **ARM** (braccio), non fa uso di apprendimento genotipico, perché lo scopo è quello di verificare se un braccio artificiale virtuale bidimensionale a tre giunti (braccio, avambraccio, mano), controllato da un sistema a reti neurali, che abbiamo descritto come learning-by-doing, effettivamente riesce ad apprendere, automaticamente e senza supervisione, un comportamento efficace nel raggiungere correttamente bersagli che vengono posizionati in posizioni casuali nel suo piano di azione.

I risultati sono nettamente positivi e confermano l'ipotesi del *Principio Ideo-Motorio (IMP)* (James, 1890; Kiesel e Hoffmann, 2004). Questo modello ipotizza che le azioni volontarie siano prodotte dall'interazione tra i dati sensoriali attuali (la posizione iniziale del braccio) e i dati sensoriali corrispondenti al risultato desiderato dell'azione (posizione finale del braccio).

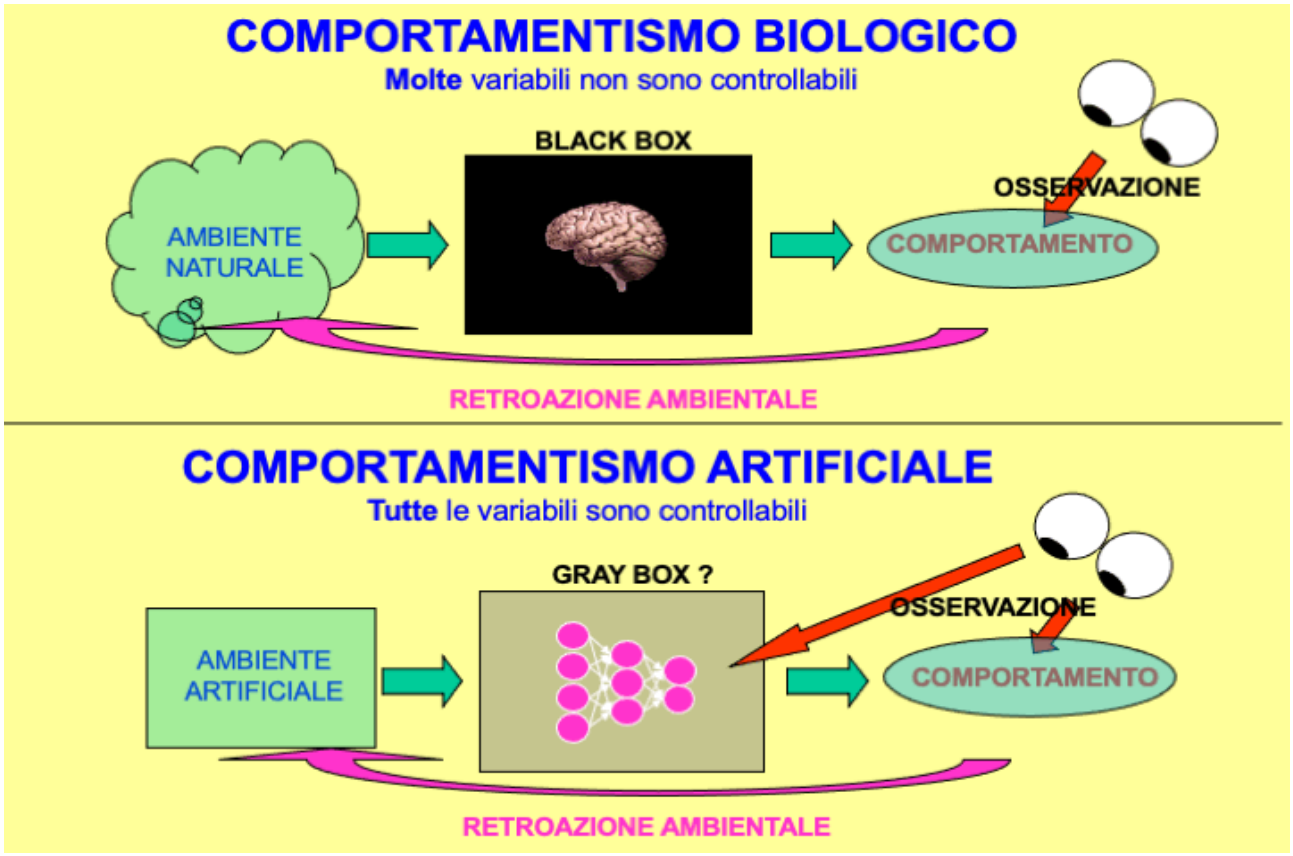
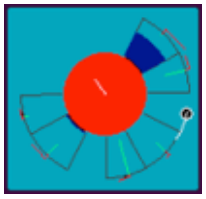


Fig. 65. Comportamentismo biologico e artificiale.

Nel quarto modello, **POSTURA** (mantenimento della posizione eretta), viene applicato lo stesso principio del modello ARM per far apprendere ad un modello bidimensionale di figura umana a quattro giunti (collo, bacino, ginocchio, caviglia) la postura eretta e i movimenti di compenso di fronte ad improvvise variazioni della base di appoggio o spinte antero-posteriori, ed anche questo ha raggiunto pienamente l'obiettivo.

Nel quinto modello, **ROOMS** (labirinto di stanze), abbiamo esteso il modello learning-by-doing dall'ambito sensori-motorio (ARM) a quello cognitivo, utilizzando qui, nuovamente, la metodica del connessionismo evolutivo. E abbiamo dimostrato che può emergere spontaneamente una sorta di *immaginazione* per raggiungere obiettivi utili alla sopravvivenza se gli organismi artificiali sono immessi in un ambiente nel quale è premiata (evolutivamente) la *previsione del risultato dell'azione.* Questo fatto può essere interpretato come un inizio di *pensiero* in un sistema artificiale, e ci fornisce una migliore comprensione delle funzioni mentali come la memoria, la previsione e il ragionamento, indispensabili per la comparsa della consapevolezza.

31. ALIFE
vita artificiale (anno 1994)



Introduzione

Si tratta della simulazione, senza pretese di verosimiglianza biologica, di un ecosistema ipersemplificato, in cui individui dotati di reti neurali (agenti), inizialmente generati casualmente e pertanto inefficaci, evolvono in competizione fra loro per il raggiungimento di pacchetti di cibo virtuale distribuiti casualmente nell'ambiente.

Il programma, per noi storico, è stato compilato nel 1994: di conseguenza è stato utilizzato il sistema operativo DOS. Ma il programma è operativo anche sotto sistema operativo Windows in emulazione DOS.

Metodo

Il mondo di questo ecosistema è una griglia bidimensionale di 640x480 caselle (o un multiplo di tali dimensioni), ripiegata a toroide in modo che i margini opposti si uniscano (non vi sono confini). In essa sono collocati gli agenti mobili, e i pacchetti di *cibo* (d'ora in poi detti brevemente cibi), immobili. Gli agenti consumano energia per mantenersi, per muoversi e per riprodursi e la reintegrano assorbendo i cibi che raggiungono.

I meccanismi evolutivi assemblano il corpo (la rete neurale) dell'*individuo* come in una sorta di LEGO utilizzando tre tipologie di cellule precostituite: alcune con capacità **visive** (sulla presenza di *cibo*), altre con capacità **motorie** (usando spinte a getto) e altre solo con capacità di **connessione** con altre cellule, Il tutto costituisce una sorta di sistema nervoso. Abbiamo scelto questa modalità piuttosto che aspettare che i meccanismi evolutivi producessero sensori visivi e motori efficienti per ovvi motivi di tempo essendo l'esperimento concentrato sulla evoluzione di meccanismi comportamentali di caccia e riproduzione.

Ogni agente è costituito da una corona circolare di cellule (unità) in numero massimo di 12. Ogni agente è anche dotato di un serbatoio di energia che viene consumata per agire e riempito progressivamente se raggiunge i cibi. Questo simula un metabolismo. Se il serbatoio viene riempito fino ad un livello prestabilito l'agente può riprodursi se si avvicina ad un altro individuo con il quale scambia parte del suo genoma artificiale. Se invece il serbatoio si svuota completamente l'agente "*muore*." La configurazione degli agenti all'inizio dell'evoluzione è totalmente casuale e saranno i processi evolutivi artificiali a determinare progressivamente le configurazioni migliori per la sopravvivenza e riproduzione.

200 agenti casualmente configurati vengono immessi nel mondo dove i cibi, anch'essi in numero e collocazione casuale, sono *visibili* da quegli agenti tra le cui cellule evolutivamente ne siano comparse alcune con capacità visive. L'intensità del segnale visivo decresce con la distanza dal cibo. La possibilità di raggiungere i cibi dipende dall'equipaggiamento motorio che ogni agente ha evolutivamente acquisito. Se un agente è dotato di una sola cellula motoria l'attivazione di questa mette solo in rotazione l'agente. Per poter effettuare uno spostamento direzionale è necessario che l'evoluzione doti l'agente di almeno due cellule motrici, bilanciandone l'effetto tra i due lati del corpo e attivandole in modo da dirigersi correttamente e raggiungere il più rapidamente possibile il cibo visto. Rapidamente, perché esiste inevitabilmente competizione tra gli agenti (anche se questi non hanno percezione gli uni degli altri) poiché il cibo può improvvisamente scomparire perché qualche altro agente invisibile lo ha raggiunto.

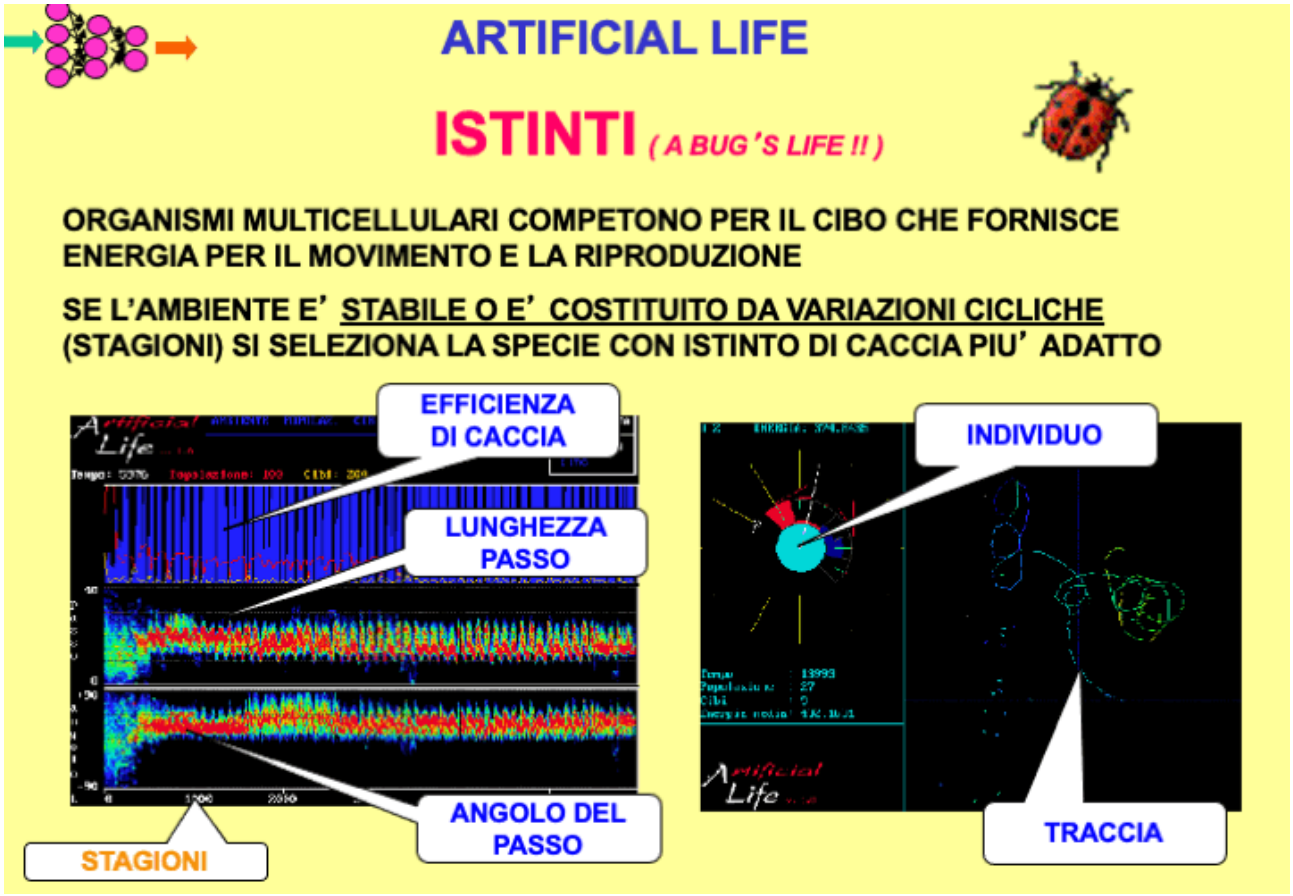


Fig. 66. Artificial Life: evoluzione di istinti di ricerca di cibo. Nel riquadro a sinistra si visualizzano grafici che rappresentano l'efficienza della caccia, la lunghezza e la direzione del passo nel corso dell'evoluzione della specie artificiale. Nel riquadro a destra è visualizzato un 'individuo' e la sua traccia di cammino nel mondo artificiale nel quale è immesso.

La distribuzione del numero dei cibi ha un andamento variabile stagionalmente, cosicché nelle stagioni di magra gli agenti meno efficaci nella caccia muoiono. Questo criterio si dimostra un efficace setaccio evolutivo per selezionare più rapidamente gli agenti migliori e perfezionare la specie.

Molti parametri del mondo, della specie e dei cibi possono essere definiti dallo sperimentatore così da valutare più facilmente le modalità d'interazione tra gli elementi del modello e individuare le caratteristiche della pressione evolutiva sulla specie in osservazione. È possibile visualizzare l'evoluzione del comportamento della specie attraverso l'andamento temporale di molti parametri, tra i quali il numero degli agenti, il numero dei cibi, le modalità di movimento degli agenti e l'efficacia della caccia (Fig. 66).

Risultati

Nell'animazione a sinistra di Fig. 67 è visualizzato il comportamento di un agente all'inizio dell'evoluzione, che non è in grado d'individuare e raggiungere nessun cibo e pertanto la sua energia si riduce progressivamente fino alla morte (dopo che il serbatoio diventa blu). Nell'animazione a destra è visualizzato un agente evoluto che individua cibi, li raggiunge e aumenta la sua energia fino a potersi riprodurre.

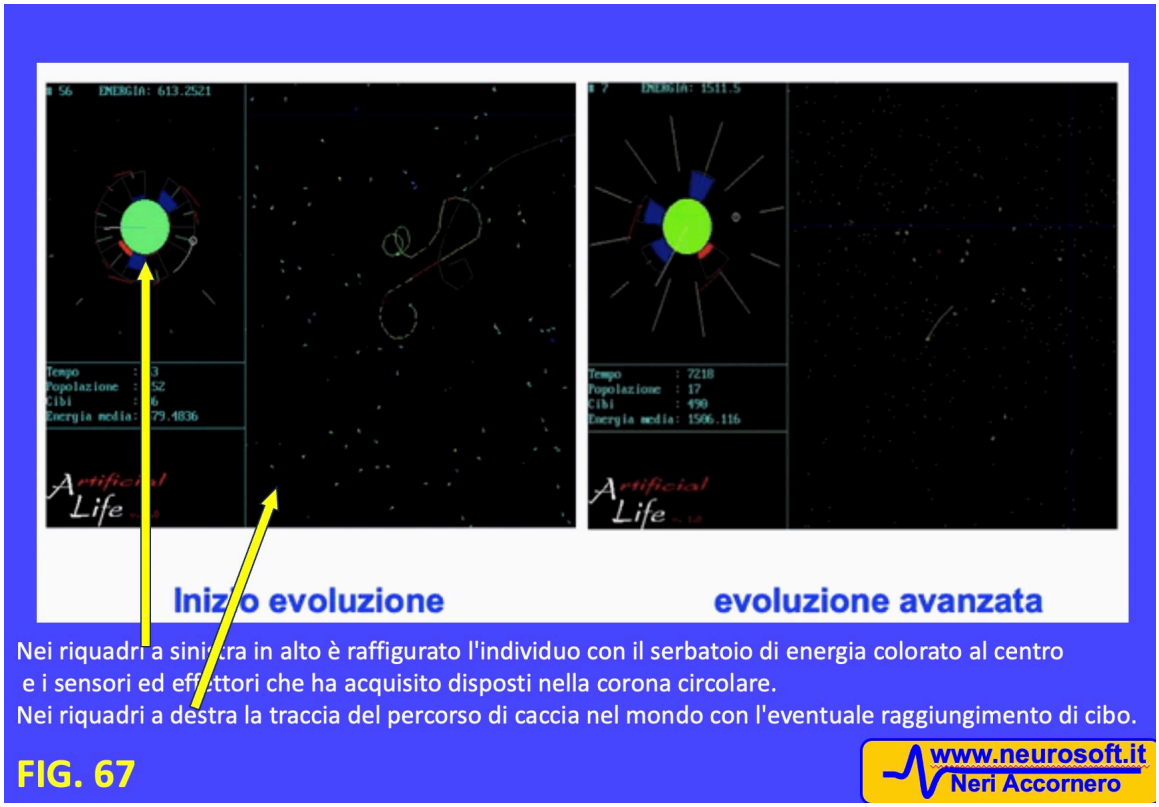


Fig. 67 (animata). Nei riquadri a sinistra in alto è raffigurato l'individuo con il serbatoio di energia colorato al centro e i sensori ed effettori che ha acquisito disposti nella corona circolare. Nei riquadri a destra la traccia del percorso di caccia nel mondo con l'eventuale raggiungimento di cibo.

Il primo obiettivo, quello di osservare la comparsa di comportamenti finalizzati alla sopravvivenza, viene raggiunto quasi invariabilmente in tutte le simulazioni pur partendo da condizioni iniziali dell'ambiente e degli agenti molto differenti. Il secondo, quello di veder comparire nella specie adattata una simmetria nella forma corporea analoga a quelle presenti nel mondo animale semovente, ha portato a risultati inaspettati generando organismi esotici ma funzionali, talora con simmetria bilaterale talora no. In tutte le simulazioni effettuate si sono invariabilmente evoluti organismi dotati di più cellule sensoriali e cellule motorie, spesso con due o tre cellule sensoriali raggruppate verso un polo dell'organismo (che possiamo considerare come polo rostrale), e due, tre, o quattro cellule motorie, generalmente localizzate sui lati e sul polo (che possiamo considerare caudale) opposto a quello sensoriale-rostrale. In questo arrangiamento due cellule motorie principali, localizzate sui lati, avevano funzioni motorie più spiccate, e vettori-forza orientati in modo da spingere il corpo nella direzione rostrale; una o due cellule motorie *accessorie*, di forza molto inferiore a quelle principali, erano spesso localizzate tra queste e il polo caudale, come a fungere da timoni. Quando queste cellule motorie accessorie erano due, i loro vettori-forza avevano invariabilmente verso opposto tra loro; quando era una sola, il verso del suo vettore-forza era tale da aggiungersi a quello della cellula motoria principale meno potente. Le varie anatomie finali si sono mostrate comunque praticamente sempre in grado di attuare comportamenti efficaci di ricerca e raggiungimento dei cibi.

Per quanto riguarda tali comportamenti si osserva che, in periodi di carenza o assenza di cibi, gli agenti attuano prevalentemente o esclusivamente piccoli movimenti circolari esplorativi a 360°, consumando relativamente poca energia; per poi, alla ricomparsa di cibi, dirigersi linearmente su di questi alla massima velocità possibile (Fig. 68). Questo comportamento, tuttavia, presenta eccezioni quando il cibo compare molto lontano dall'individuo: in questo caso gli agenti distanti dal cibo si astengono dal dirigersi sui cibi lontani, anche se visibili, e modificano poco o nulla il loro comportamento di ricerca. Questo comportamento, apparentemente strano, ha la sua ragion d'essere nel fatto che ogni agente impara geneticamente che i cibi lontani spariscono più facilmente prima di essere raggiunti rispetto a quelli vicini. Questo è dovuto alla predazione effettuata dagli altri agenti, invisibili a ciascun agente, ma più prossimi ai cibi. In sostanza traducendo questo comportamento in linguaggio umano "il cibo lontano sparirà prima che io lo possa raggiungere, quindi è inutile che sprechi energie per tentare di farlo". Siamo noi stessi rimasti meravigliati che reti così semplici, 12 unità o meno, possano dimostrare comportamenti così sofisticati che, se dovessero essere stati progettati a priori, avrebbero richiesto notevoli calcoli matematici e non è detto che avrebbero raggiunto la stessa efficienza.

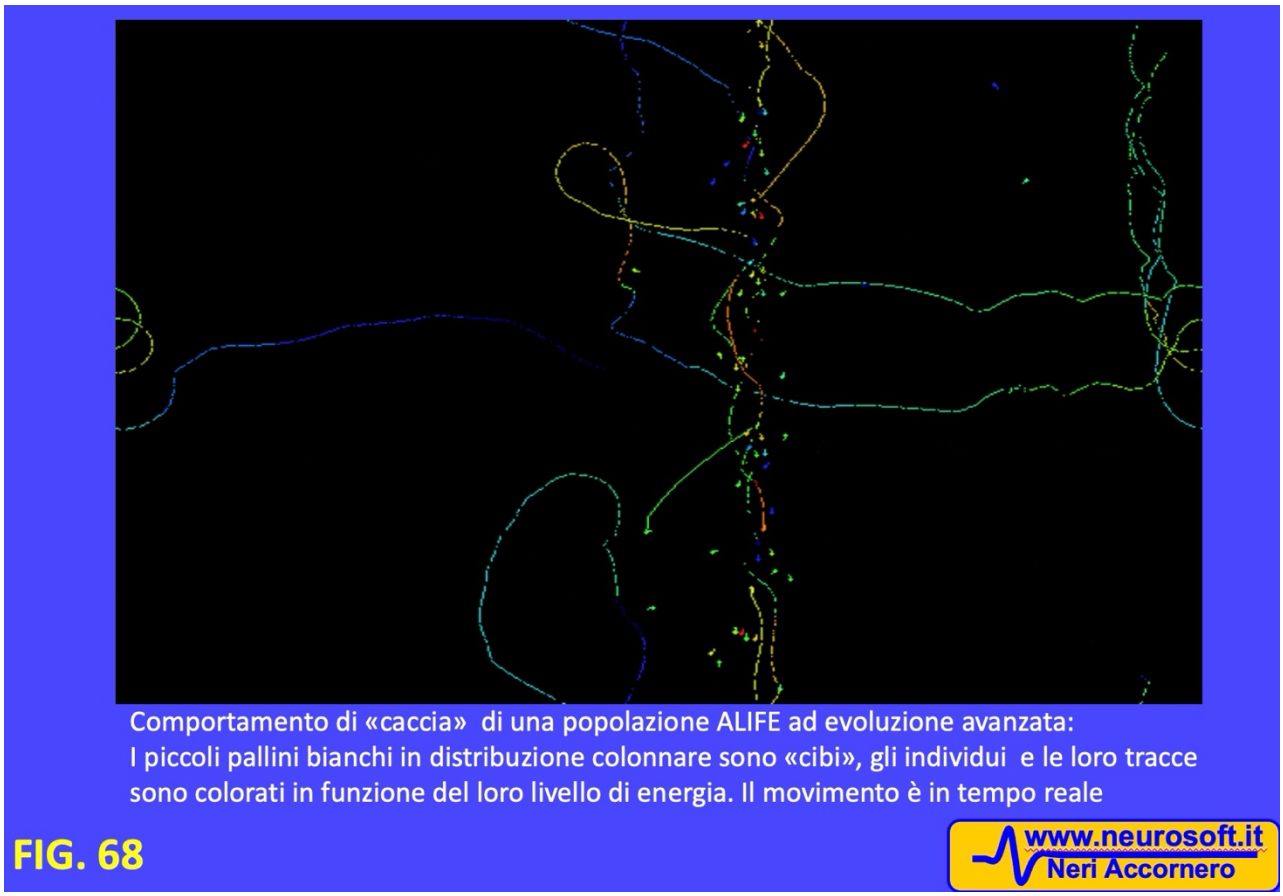


Fig. 68 (animata). Popolazione evoluta e stabile. La velocità di spostamento degli individui è in tempo reale. In questo caso i cibi compaiono ciclicamente in raggruppamenti colonnari verticali. Gli individui manifestano un efficiente comportamento di caccia, raggiungono i cibi e si riproducono come viene indicato dal cambiamento di colore delle tracce.

In questa animazione ad evoluzione avanzata, i cibi (piccoli punti bianchi, meglio visibili ingrandendo l'immagine) compaiono in colonne verticali, e le tracce colorate degli agenti, il cui colore indica il rispettivo livello di energia, dimostrano la loro capacità di ricerca e raggiungimento dei cibi con conseguente riproduzione. La velocità della simulazione è in tempo reale.

Se, nel corso della simulazione, lo sperimentatore cambia uno o più parametri ambientali (densità e ciclicità stagionale del cibo) o fisici (bilancio energetico consumo / rendimento), si nota che la variazione di ogni parametro stravolge profondamente la linea evolutiva della popolazione, la quale può arrivare ad estinguersi, oppure, nell'arco di alcune generazioni, adattarsi al cambiamento con l'affermarsi di nuovi comportamenti idonei alla nuova situazione ambientale. L'estinzione o l'adattamento dipendono ovviamente dall'entità e dalla rapidità del cambiamento (cambiamenti grandi ma progressivi sono affrontati meglio di cambiamenti meno grandi ma istantanei) e dal grado di specializzazione della specie in evoluzione (specie meno evolute si adattano più facilmente di specie altamente ottimizzate all'ambiente ora modificato).

Tra le altre osservazioni degne di nota è il fatto che il sistema è fortemente dipendente dalle condizioni iniziali, e ciò non meraviglia essendo esso ricco di relazioni non lineari, tanto da assimilarlo per certi versi ad un sistema caotico deterministico e, secondariamente, che un ambiente uniforme o ciclicamente stabile (stagioni) seleziona generalmente un'unica specie di individui meglio adattati dotati di comportamenti istintivi. I meccanismi evolutivi genetici scovano utilmente caratteristiche statiche e dinamiche dell'ambiente anche non facilmente prevedibili dallo sperimentatore.

ESPERIENZA (apprendimento fenotipico individuale)

Nella precedente sperimentazione abbiamo visto comparire evolutivamente un comportamento istintivo di caccia molto efficiente (riflessi genetici), qui descriviamo molto sommariamente un altro esperimento di vita artificiale con varianti che hanno prodotto evolutivamente un riflesso condizionato quindi una modalità di apprendimento fenotipico individuale.

In questa sperimentazione 200 "individui", costituiti ognuno da una rete neurale inizialmente costituita randomicamente con un numero di unità compreso tra 6 e 36 e connessioni altrettanto casuali tra 6 e 36 per ogni unità, sono sottoposti in sequenza ad un compito cosi definito: L'individuo non si muove, gli viene presentato in sequenza randomica uno di quattro cibi con qualità differenti (edibili o velenosi) e l'individuo può scegliere se mangiare o no. Due cibi sono stabilmente definiti e percepiti dalla rete uno come edibile con codice binario (11), e uno come velenoso (00). Gli altri due, edibili e velenosi, hanno un codice variabile da 10 a 01 casualmente ad ogni generazione. L'uscita della rete è codificata su di una unità come 1 = mangio e 0 = non mangio. In conseguenza dell'azione il serbatoio di energia viene incrementato o decrementato di un valore costante X, predefinito dall'operatore, a seconda dell'effetto del cibo presentato. Questa informazione, la *variazione* del serbatoio, è disponibile alla rete al turno successivo su di un'unità che assume valore 1 se l'energia è incrementata e valore 0 se è diminuita.

Il criterio per definire la variazione di energia dopo l'azione è il seguente:

Se l'azione è corretta (mangio un cibo edibile o evito un cibo velenoso) l'incremento è X

Se l'azione è sbagliata (mangio un cibo velenoso o evito un cibo edibile) il decremento è X

Ogni individuo è testato per 100 turni (25 casualmente per ogni cibo), al termine di questi, il valore del serbatoio di energia, che può essere positivo o negativo, viene utilizzato alla fine del test di tutta la popolazione per ordinare in modo decrescente la performance di tutti gli individui, e definire proporzionalmente la probabilità del numero di discendenti per ogni individuo che saranno poi sottoposti alle regole evolutive artificiali (mutazione casuale). Nella figura 69 viene mostrata la storia evolutiva di una popolazione e per lo sperimentatore le tracce colorate rappresentano il numero medio di cibi mangiati, secondo il loro effetto, ad ogni generazione durante l'evoluzione.

Fig. 69. Vita artificiale: comparsa evolutiva di **istinti** e successivamente di **riflessi condizionati**

Per quanto riguarda l'apprendimento genetico (istinto) l'evoluzione seleziona automaticamente e rapidamente gli individui che meglio scelgono di mangiare i cibi stabili edibili ed evitare quelli velenosi, perché avranno un serbatoio di energia più ricco alla fine del test e quindi una prole più numerosa, senza la necessità che il singolo individuo valuti l'effetto conseguente la sua scelta, e in circa 400 generazioni tutta la popolazione, per trasmissione genetica, è stata in grado di distinguere correttamente tra i due cibi con codice stabile ma non per quelli con codice variabile. Ma dopo circa 4000 generazioni è comparsa in alcuni individui la **capacità di apprendere nel corso della propria vita** quale dei due cibi variabili è edibile e quale no indipendentemente dal codice con il quale apparivano. È un riflesso condizionato, possibile grazie alla comparsa (mutazione) della *memorizzazione,* per mezzo di nuove connessioni ricorrenti nella rete neurale, di uno stato iniziale sensoriale e dell'azione eseguita da confrontare con lo stato sensoriale conseguente. Dopodiché per trasmissione genetica (è la capacità di apprendere che viene trasmessa geneticamente) in poche successive generazioni la maggior parte della popolazione ha assunto questa capacità che evidentemente migliora l'efficienza nella scelta operativa. È una *tripletta associativa*: uno **stato sensoriale iniziale** memorizzato (codice del cibo presentato) e **l'azione** (mangiato, non mangiato) e lo stato **sensoriale finale** (variazione del serbatoio al turno successivo).

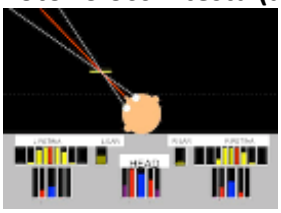
Discussione e conclusioni

Questo studio conferma che gli algoritmi genetici si dimostrano altamente efficaci nel produrre adattamento selettivo all'ambiente. Conferma inoltre che la probabilità di rintracciare negli ecosistemi artificiali similitudini con il mondo biologico dipende fortemente dalla realistica implementazione delle leggi fisico-chimiche del mondo reale. Ma soprattutto questa sperimentazione, al di là degli specifici risultati che si possono osservare, ha il merito di dimostrare in modo tangibile ed inequivocabile la potenza dei meccanismi evolutivi darwiniani, e di confermare la validità dei metodi simulativi come strumenti d'indagine scientifica.

Se un'immagine vale mille parole, e un film ne vale un milione, una simulazione dinamica ne vale un miliardo. Di fatto il modello ALIFE, per quanto riduttivo, appare un ottimo laboratorio virtuale per osservare i meccanismi evolutivi darwiniani in azione.

32. GAZE

controllo motorio occhi testa (anno 2004)



Introduzione

Questa simulazione mostra l'evoluzione di meccanismi di coordinazione sensori-motoria paragonabili a quelli umani in un modello occhi-testa, che insegue con lo sguardo un bersaglio mobile (Fig. 70).

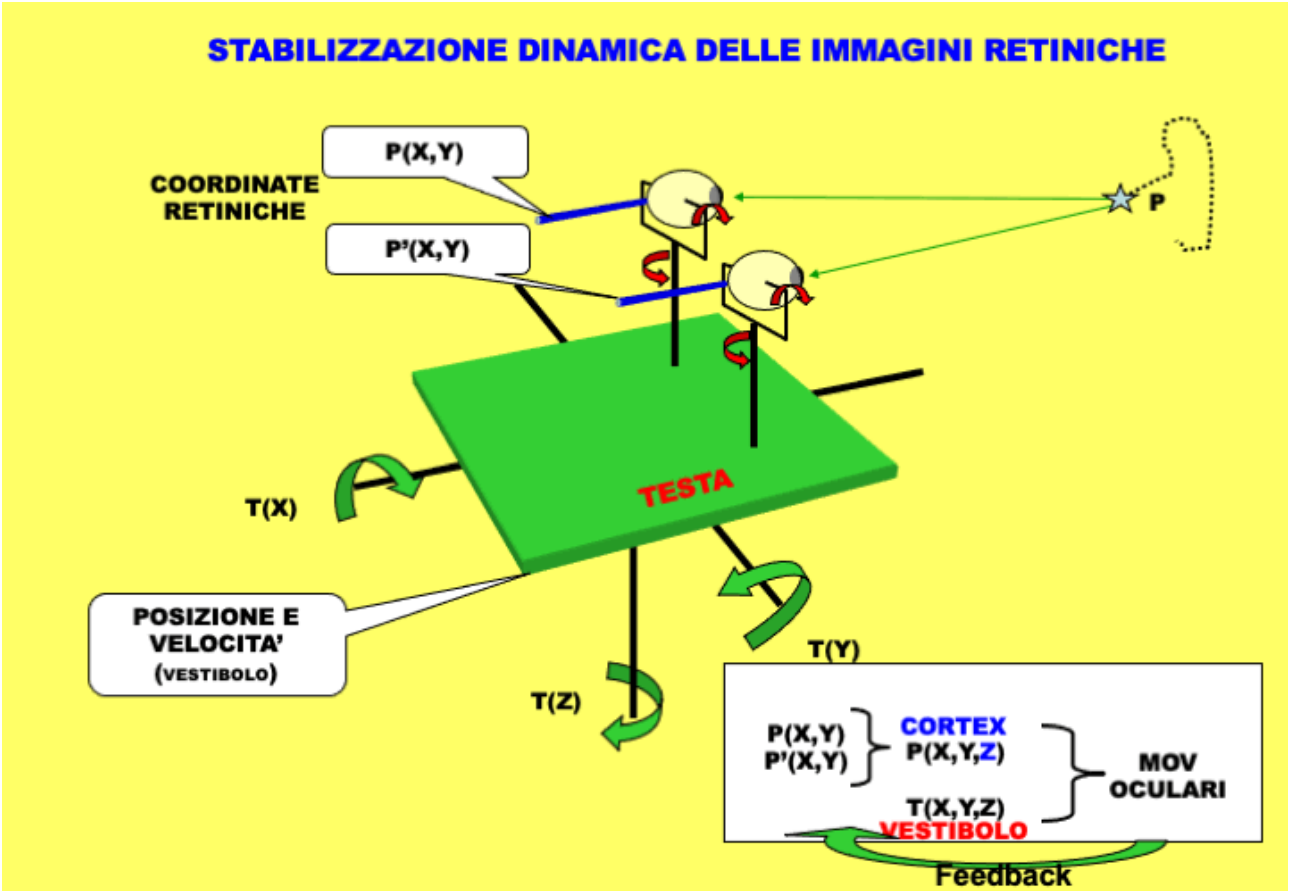


Fig.70. Rappresentazione del controllo sensori-motorio del capo e degli occhi, necessario per mantenere lo sguardo su di un bersaglio mobile, nei mammiferi superiori.

Nell'uomo il compito di mantenere lo sguardo su di un bersaglio mobile è un compito assai elaborato, poiché le variabili da controllare sono molte e concatenate. Il corpo è mobile e la testa è mobile sul corpo su tre assi; inoltre, per puntare il bersaglio con la visione stereoscopica, i due bulbi oculari devono

potersi muovere in modo convergente o divergente. Questo è un problema analogo a quello di una nave da guerra che, navigando su mare agitato, deve colpire un aereo in volo. La risoluzione di questo difficile compito richiede sensori ed effettori di puntamento veloci e accurati e una notevole quantità di equazioni matematiche interagenti in tempo reale. Il sistema nervoso umano fa tutto questo senza l'ombra di un calcolo matematico e lo fa molto bene. Ancora una volta questo è frutto di ciechi processi evolutivi che lasciano sbigottiti.

L'obiettivo è mettere alla prova l'ipotesi che analoghe richieste ambientali (compiti influenzanti la fitness), ed analoghi equipaggiamenti e vincoli fisici, portano all'evoluzione di analoghi comportamenti e meccanismi neurali di controllo in un sistema artificiale. L'indagine è quindi focalizzata a livello del controllo neurale, mentre i sensori (occhi e orecchie) e gli effettori (muscoli per muovere la testa e gli occhi) sono assunti come già presenti, già evoluti, e sono simulati a un livello biologicamente più realistico rispetto a quelli in ALIFE.

Metodo

Una popolazione di agenti simulati, dotati di un modello semplificato bidimensionale occhi-testa mosso da una rete neurale, viene sottoposta al compito di seguire con lo sguardo un bersaglio mobile e fatta evolvere con algoritmo genetico volto a migliorare la prestazione nel compito.

Agenti

Ogni agente è costituito da una testa mobile con due occhi mobili indipendentemente e due orecchie (Fig. 70). Ciascun occhio contiene una retina. Le due retine ricevono l'immagine di un oggetto lineare (bersaglio) che si muove bidimensionalmente e casualmente davanti agli occhi con velocità variabile, e a volte emette un suono (simulato) che viene ricevuto differenzialmente dalle orecchie in relazione alla sua posizione. La fitness è misurata su quanto a lungo e con quanta precisione l'agente riesce a mantenere l'immagine del bersaglio centrata in ciascuna retina (foveazione).

Sensori

Ognuna delle due retine è composta da 9 campi recettivi in contiguità lineare (una fovea centrale e 4 recettori laterali simmetrici) parzialmente sovrapposti, ognuno dei quali informa della sua attivazione una unità di input della rete neurale. Questa disposizione consente di valutare la distanza del bersaglio in base alla grandezza della sua immagine sulla retina monodimensionale, non alla posizione bidimensionale che l'osservatore vede nel modello sullo schermo del computer.

Le orecchie ricevono brevi suoni emessi a intervalli casuali dal bersaglio, suoni che arrivano con intensità inversamente proporzionale alla distanza bersaglio-orecchio che può essere diversa nei due orecchi (le differenze di fase non sono prese in considerazione in questa simulazione semplificata), e ogni orecchio invia le sue informazioni quantitative ad una unità di input della rete neurale.

Il corredo sensoriale è completato da informazioni propriocettive dai muscoli e dai legamenti del capo e degli occhi (Fig. 71).

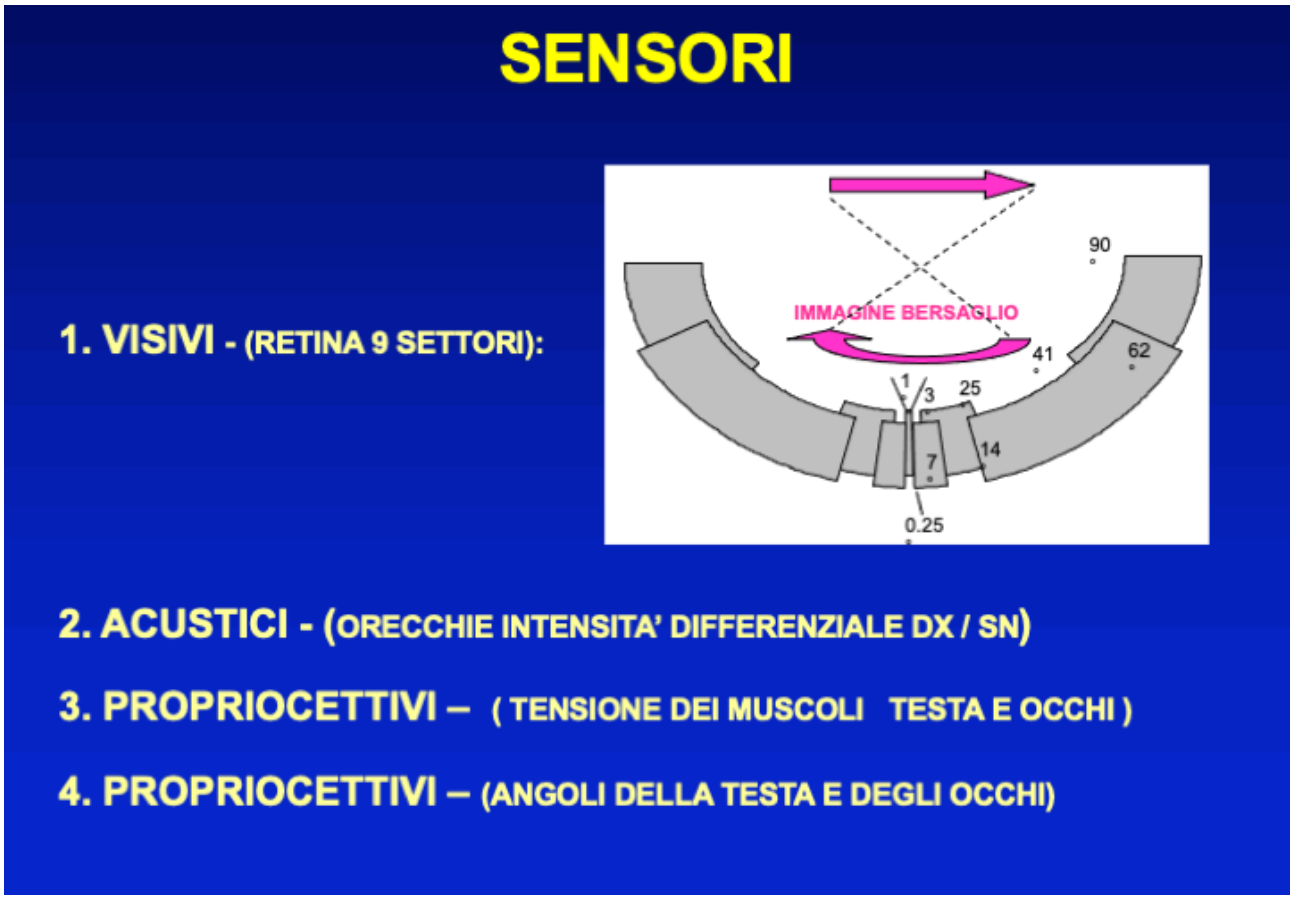


Fig. 71. Sensori exo (vista, udito) e propriocettivi (tensioni muscolari e articolari) del modello.

Effettori

La testa (Fig. 72) è fatta ruotare sul piano orizzontale da due muscoli antagonisti che simulano i muscoli sternocleidomastoidei, di cui quello di sinistra fa ruotare la testa in senso orario, quello di destra in senso antiorario. Ciascun occhio è fatto indipendentemente ruotare orizzontalmente entro l'orbita da due muscoli che simulano i muscoli retti laterale e mediale. I punti d'inserzione muscolare, le lunghezze dei muscoli, le rotazioni massime di testa e occhi, e il rapporto di massa occhi-testa, sono mantenuti conformi alla realtà biologica, così come pure la curva tensione-lunghezza dei muscoli, simulati con un modello a molla biologicamente plausibile. Ogni muscolo è azionato da una unità di output della rete neurale di controllo, la cui attivazione determina lo stato di tensione del muscolo corrispondente.

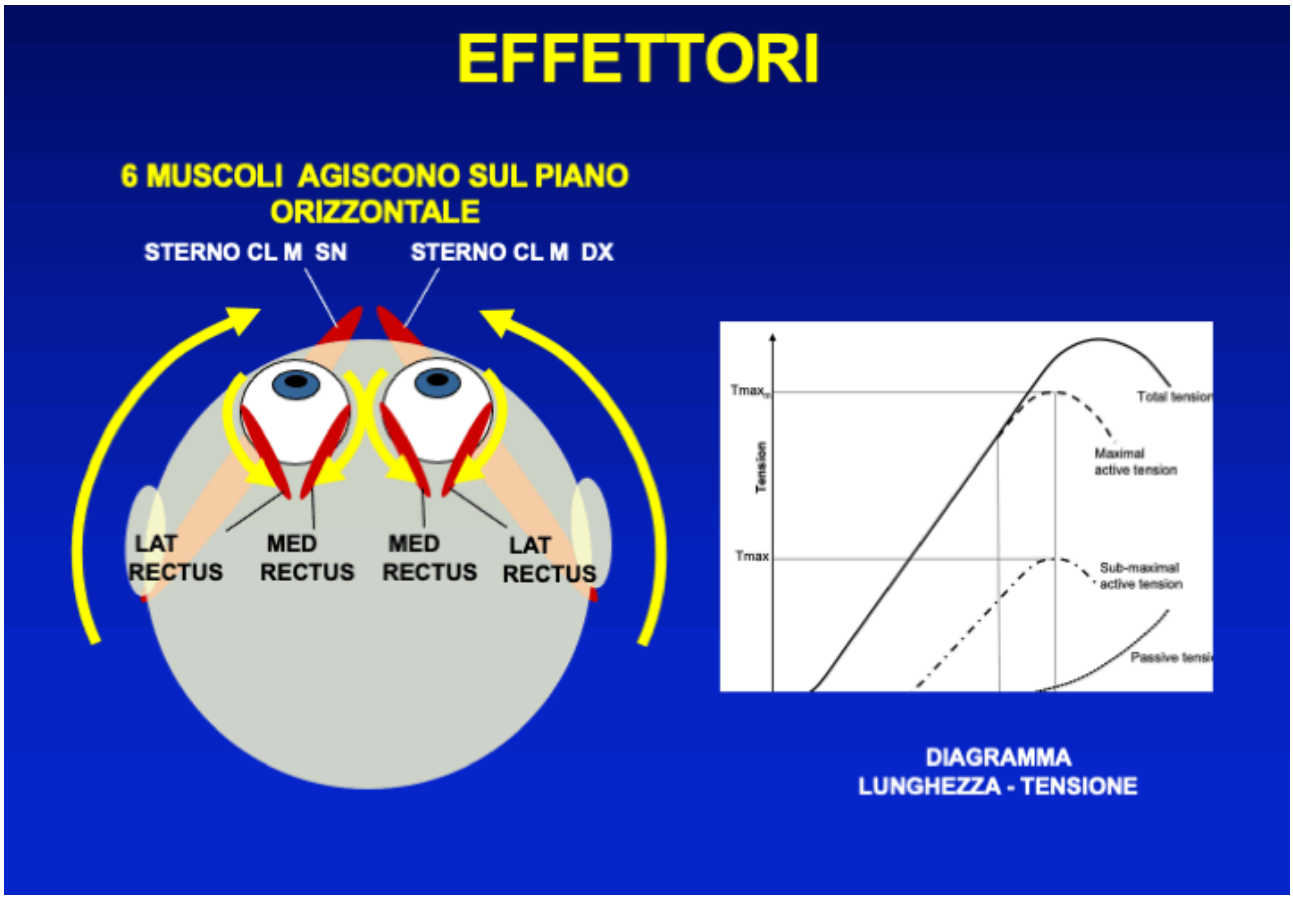


Fig. 72. Effettori muscolari del capo e degli occhi nel modello.

Rete neurale

La rete neurale per il controllo sensori-motorio (Fig. 72) riceve input visivi dalle due retine, input acustici dalle orecchie, informazioni propriocettive sulle posizioni degli occhi e della testa e sulla tensione dei relativi muscoli, per un totale di 29 unità di input (18 visive, 2 uditive, e 9 propriocettive); e genera output analogici di attivazione per i 6 muscoli (2 per ciascun occhio e 2 per la testa), per un totale di 6 unità di output. Tali unità di input ed output sono fisse in quanto legate al sistema dei sensori ed effettori che in questo esperimento non è soggetto a mutamenti evolutivi. Ad esse si aggiunge un numero variabile di unità nascoste, con connessioni casuali fra esse e con le unità di input e output, che vengono riconfigurate in numero e connessioni dalla selezione evolutiva.

Apprendimento

Il metodo di apprendimento qui applicato è quello genetico o genotipico (apprendimento di specie), per selezione differenziale con algoritmo genetico (v. cap. 27 *Il Connessionismo, Algoritmi genetici)*. Alla fine di ogni generazione le prestazioni degli agenti sono messe a confronto, e agli agenti migliori è dato un numero di discendenti per la generazione successiva maggiore rispetto agli altri. I discendenti sono sottoposti a mutazione e incrociamento (*crossover* o *crossing-over*) per costituire la nuova generazione,

di cui vengono nuovamente misurate le prestazioni, e così proseguendo. Ad ogni generazione i genitori, dopo la riproduzione, sono cancellati; diversamente da ALIFE le generazioni non si sovrappongono: i figli non vivono contemporaneamente ai genitori, ma sono generati alla fine della vita di quest'ultimi, in numero probabilisticamente proporzionale alla fitness del genitore (riproduzione differenziata).

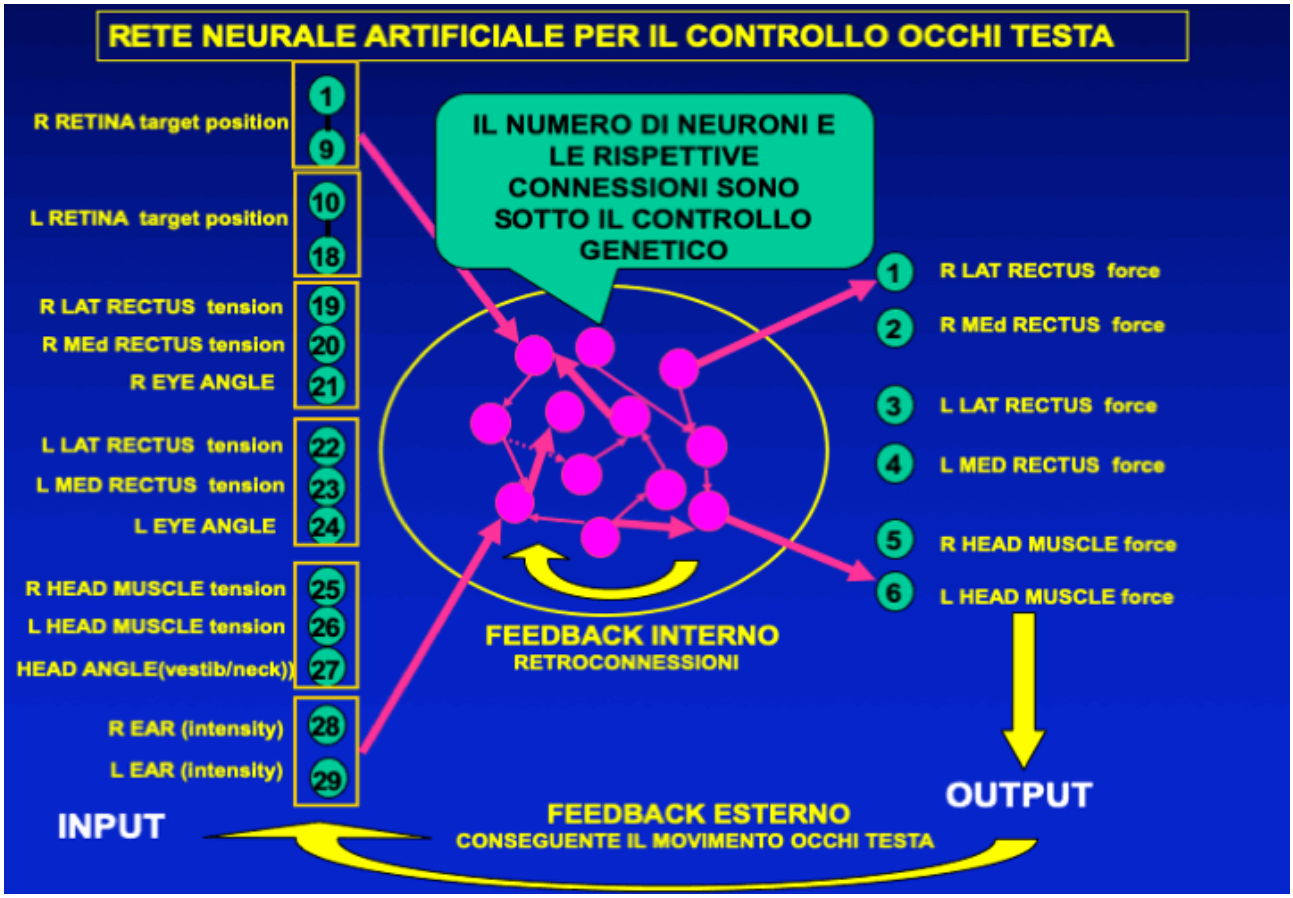


Fig. 73. Struttura sensori-motoria del modello GAZE con rete neurale sottoposta a processo evolutivo artificiale.

Esperimenti

Abbiamo simulato una popolazione costituita da un numero fisso e costante di 100 agenti. Alla rete neurale di ciascun agente è stato inizialmente assegnato un numero casuale di unità nascoste tra 8 e 32, con connessioni di peso casuale da -1 a +1 tra esse e con le unità di input ed output. In ogni generazione ciascun agente è stato fatto vivere per 10.000 turni di simulazione in modo indipendente dagli altri agenti e sono state misurate le sue prestazioni in solitario nel seguire con lo sguardo il bersaglio lungo un percorso casuale identico per tutti gli agenti della stessa generazione. Abbiamo proseguito la simulazione finché la popolazione non ha raggiunto un errore medio nel seguire il bersaglio (differenza angolare tra la direzione di sguardo e il centro del bersaglio) di 5°, media delle 100 reti in ogni generazione, equivalente a meno dell'angolo di 1 minuto sul quadrante di un orologio. Per

esaminare le caratteristiche del controllo sensori-motorio ottenuto abbiamo isolato a questo punto l'individuo migliore ed analizzato in dettaglio le sue prestazioni facendogli seguire con lo sguardo un bersaglio che si muoveva lungo una *nuova* traiettoria prestabilita con molte variazioni di direzione e velocità, con movimenti rapidi e lenti e con pause. Infine abbiamo ripetuto questo test anche in tre condizioni *mai realizzate nel corso dell'evoluzione della popolazione*: con la testa bloccata; con gli occhi bloccati; e variando le dimensioni del bersaglio.

Risultati

La popolazione ha raggiunto un errore medio di 5° in 4500 generazioni (circa 90 ore su un comune PC di del 2004) (Fig. 74). Le reti hanno ottenuto questo ottimo risultato sviluppando 23 unità nascoste, valore consolidatosi fin dalla 500ª generazione.

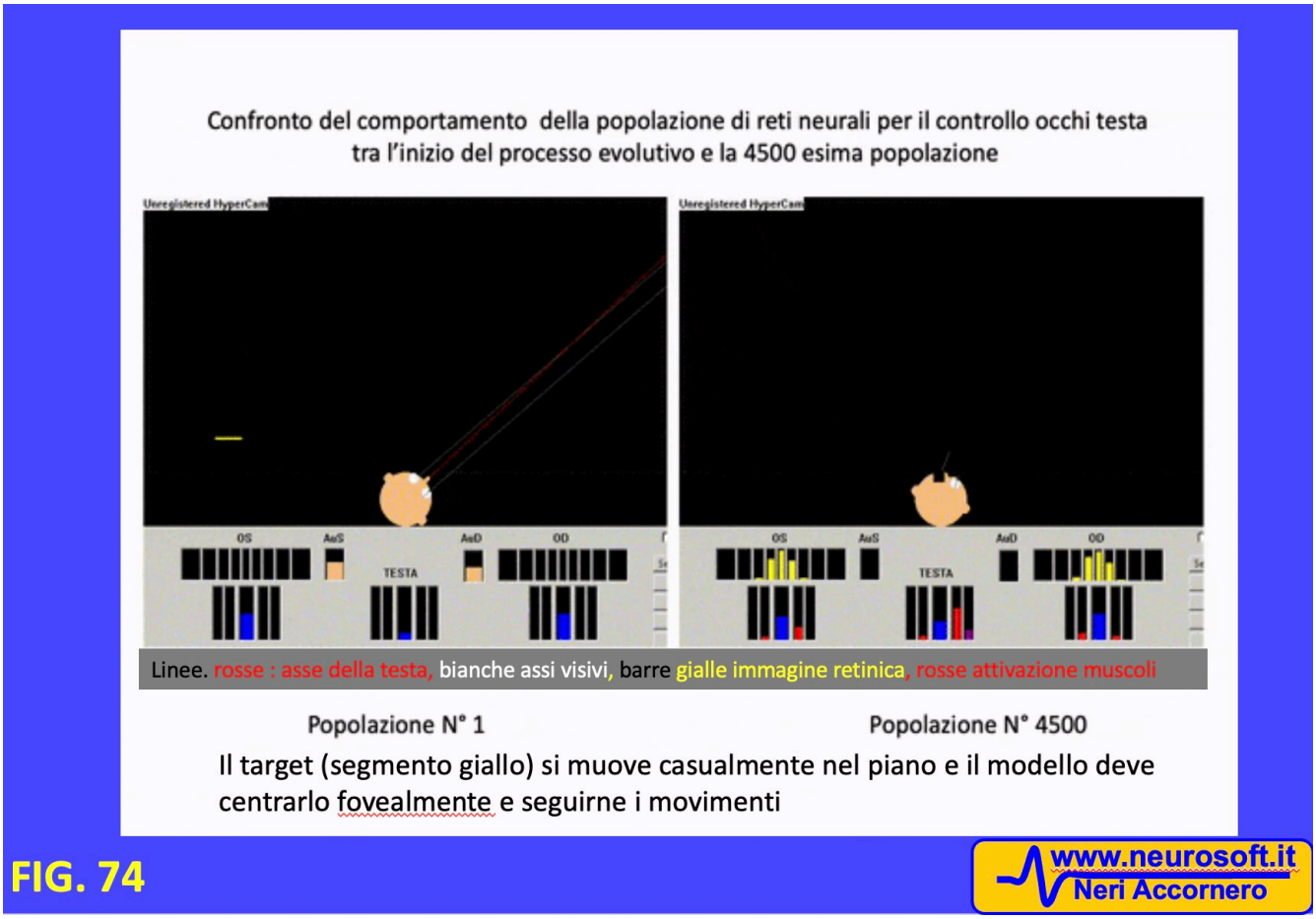


Fig. 74 (animata). Differenza del comportamento di inseguimento del bersaglio mobile prima e dopo il processo evolutivo. A sinistra miglior individuo della generazione 1, a destra miglior individuo della generazione 4500.

L'individuo migliore, sottoposto al test di seguire con lo sguardo un bersaglio che si muoveva lungo una traiettoria prestabilita con molte variazioni di direzione e velocità, con movimenti rapidi e lenti e con

pause (Fig. 75), si è mostrato capace di attuare efficacemente il controllo motorio desiderato, generando movimenti oculari rapidi coniugati (foveazione binoculare) e non coniugati (convergenza), e movimenti rapidi (saccadi) e lenti (inseguimento, pursuit) corrispondenti alla posizione e velocità del bersaglio (Fig. 76). Questo tipo di comportamento è risultato molto simile a quello di sistemi biologici (uomo e primati).

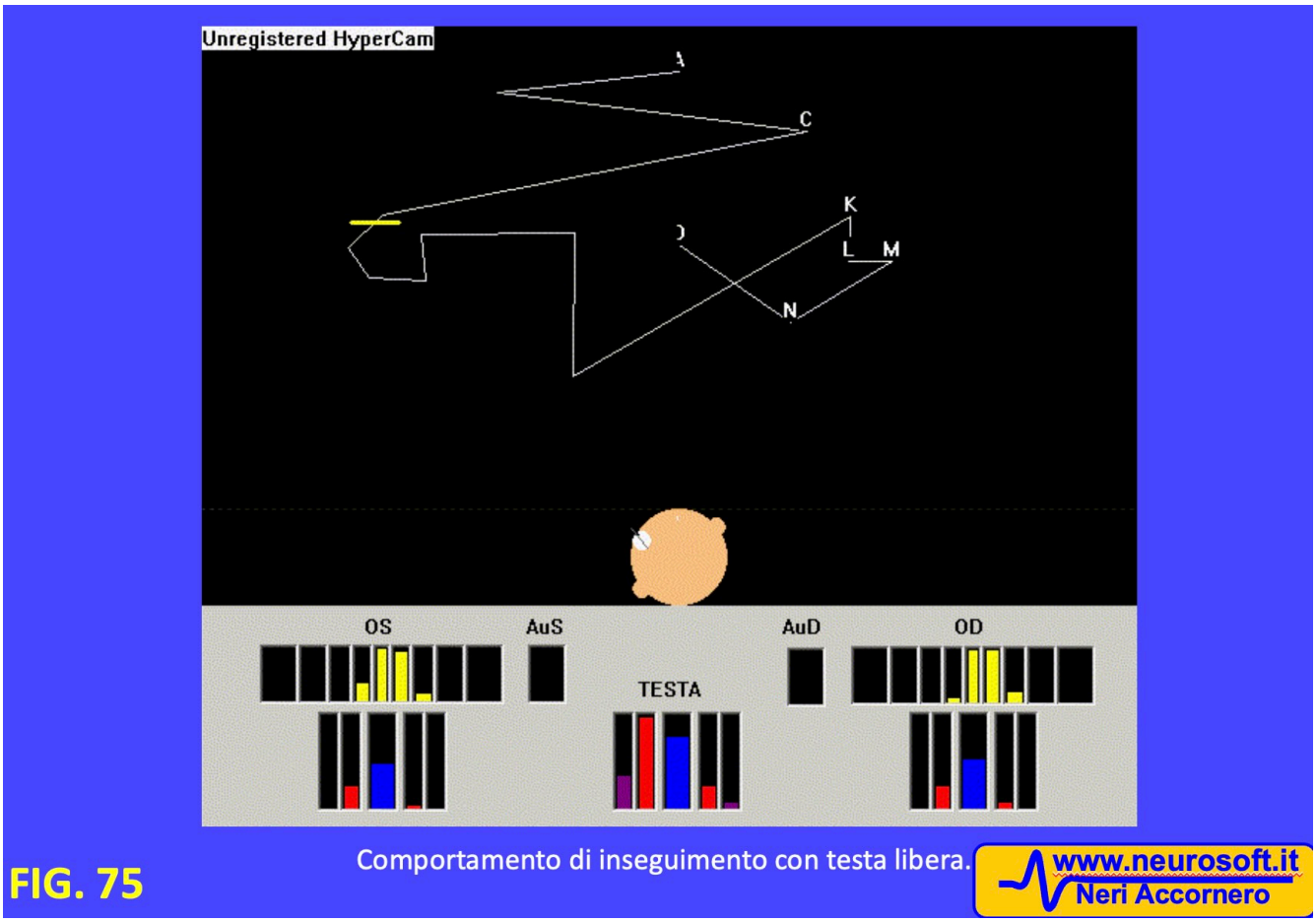


Fig. 75 (animata). Comportamento di inseguimento con testa libera.

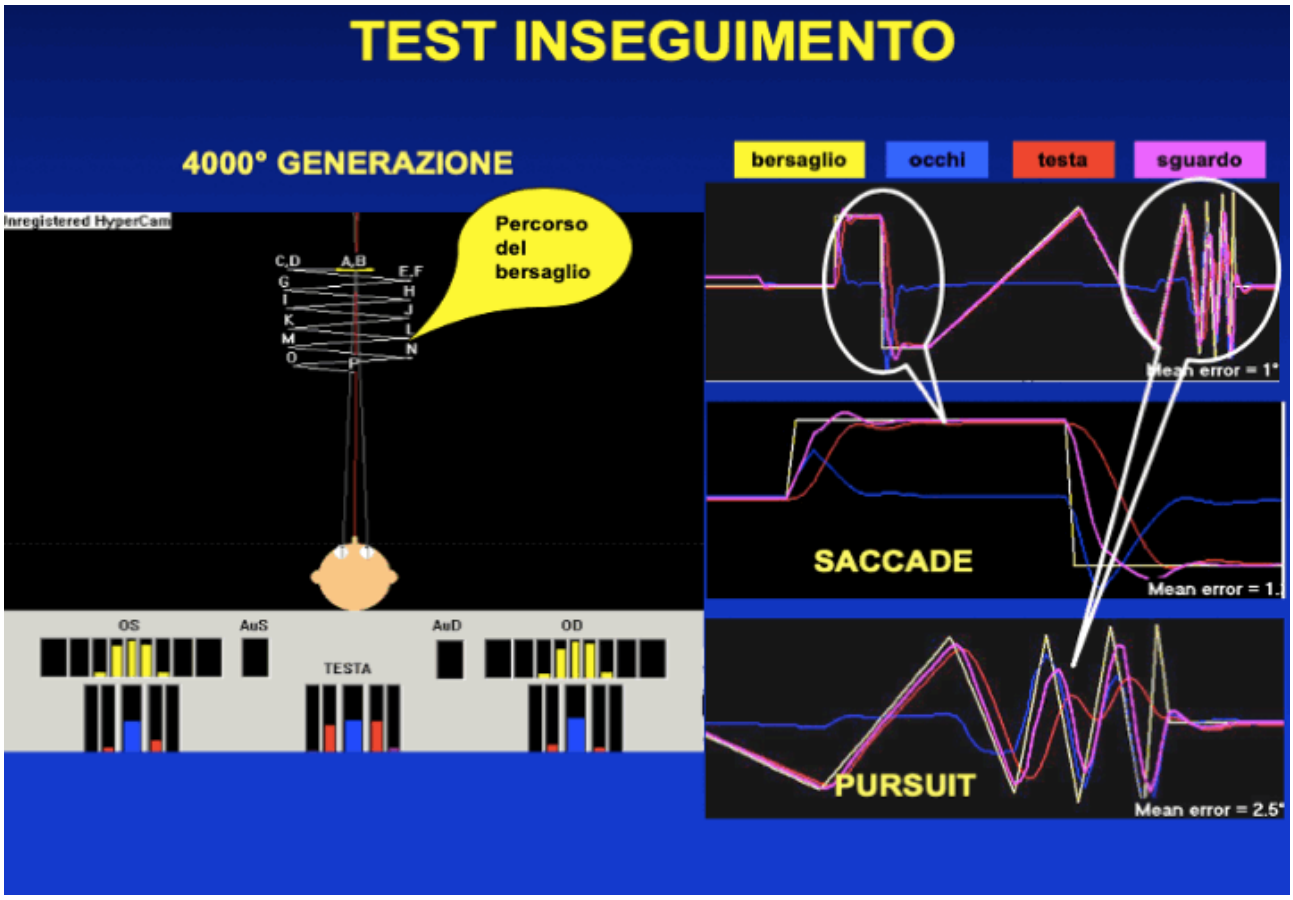


Fig. 76. Comparsa di movimenti saccadici e di inseguimento lento analoghi a quelli umani.

In particolare abbiamo osservato che, di fronte a movimenti rapidi del bersaglio, gli occhi si muovevano velocemente così che lo sguardo raggiungeva rapidamente la posizione approssimativa del bersaglio; poco dopo la testa iniziava a muoversi e gli occhi compivano un movimento compensatorio retrogrado, armonico con la rotazione della testa, che li riportava in posizione primaria pur mantenendo lo sguardo fisso sul bersaglio (compensatory eye movements) (Fig. 77). I tracciati di questi movimenti sono risultati molto simili a quelli registrati da diversi autori in esperimenti nell'uomo e nei primati (Bizzi, E. (1974): *The Coordination of Eye-Head Movements Sci Am. 231*, 100-106

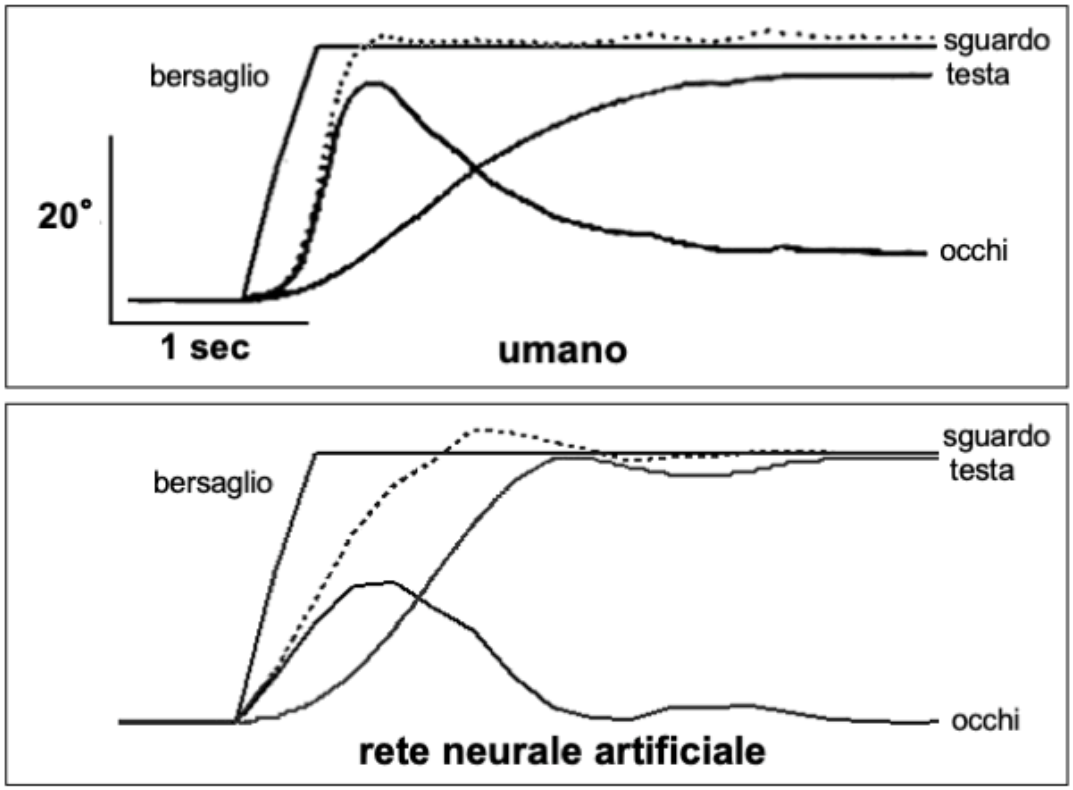


Fig. 77. Confronto del controllo motorio di sguardo tra umano e modello artificiale.

Se invece il movimento del bersaglio era abbastanza lento da poter essere seguito solo con rotazione della testa non si osservava alcun movimento degli occhi, ancora similmente a quanto accade nei sistemi biologici.

Al test di ripetere il medesimo compito con la testa bloccata (Fig. 78) il sistema ha compensato efficacemente tramite ampi movimenti oculari, esattamente come fanno i sistemi biologici. Anche nel test ripetuto bloccando gli occhi anziché la testa il sistema ha manifestato un comportamento compensatorio, almeno per movimenti del bersaglio abbastanza lenti da consentire l'inseguimento con la testa (di massa e inerzia ovviamente maggiore rispetto agli occhi). Ed anche nel test ripetuto con dimensioni variabili del bersaglio il sistema si è comportato adeguatamente, seguendo il bersaglio senza significative differenze di prestazione. Sottolineiamo che questi risultati sono particolarmente interessanti, in quanto va notato che queste tre condizioni non erano mai state sperimentate dagli agenti nel corso dell'evoluzione dalla popolazione. Nelle prime due venivano cambiate le capacità degli effettori; nell'ultima, i dati sensoriali.

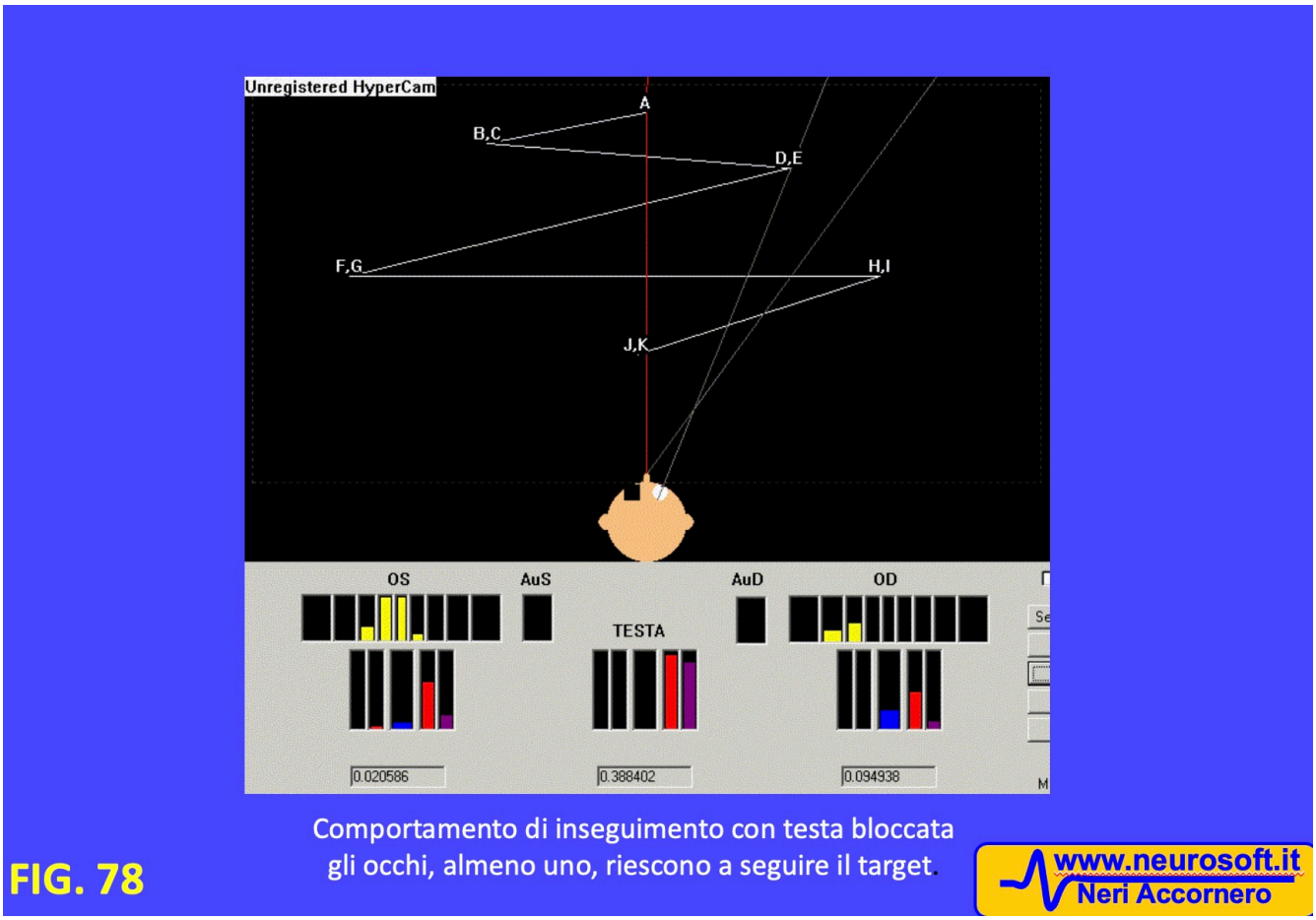


Fig. 78 (animata). Comportamento di inseguimento con testa bloccata.

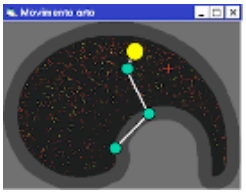
Discussione e conclusioni

Come abbiamo detto il modello agisce su un piano bidimensionale, cosicché i suoi sensori ed effettori sono limitati in questo senso, come pure il bersaglio mobile che si muove sullo stesso piano. Nonostante questa limitazione i risultati sembrano sostenere la tesi che condizioni simili portano a controlli motori simili. In 4.500 generazioni l'evoluzione simulata ha prodotto una popolazione di reti capaci di fissare e seguire un bersaglio mobile con movimenti coordinati occhi-testa simili a quelli dei sistemi biologici, e parimenti capaci di compensare mutamenti delle condizioni di funzionamento dei sensori e degli effettori. Lo studio suggerisce inoltre che in questo tipo di simulazioni i risultati dipendono notevolmente dal livello di dettaglio nel simulare le caratteristiche ambientali e biologiche.

Da questi risultati pensiamo quindi che nella robotica, quella antropomorfa in particolare, la progettazione dei sistemi di controllo dovrebbe essere sostituita dal definire accuratamente l'equipaggiamento sensoriale e motorio, gli obiettivi, e l'ambiente, lasciando ai meccanismi evolutivi l'onere di individuare la soluzione migliore per il controllo motorio.

33. ARM

controllo di un braccio simulato (anno 2001)



Introduzione

Questa simulazione e la successiva POSTURA illustrano il meccanismo di apprendimento fenotipico che riteniamo essere il meccanismo fondamentale con cui il sistema nervoso apprende dall'esperienza, descritto nel cap. 28 *Learning-by-doing*. Dato che qui l'obiettivo è dimostrare le capacità di apprendimento spontaneo di un sistema sensori-motorio, piuttosto che osservare la comparsa spontanea della funzione in una popolazione in evoluzione, questa simulazione, a differenza delle precedenti, non include apprendimento genetico. Non è simulata una popolazione di reti in evoluzione, ma una singola rete con architettura precostituita, una tripletta sensori-motoria come abbiamo descritto nel cap. 28, sottoposta ad apprendimento non supervisionato.

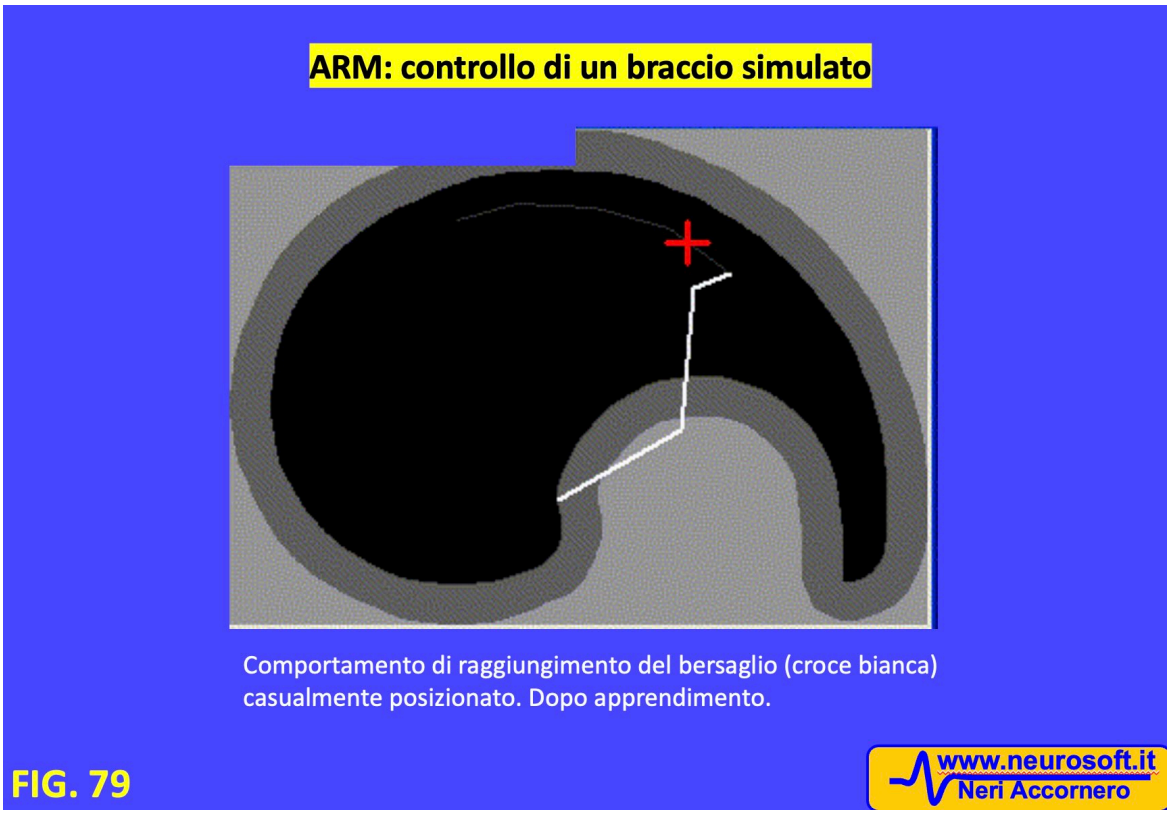


Fig. 79 (animata). Comportamento di raggiungimento del bersaglio (croce bianca) casualmente posizionato. Dopo apprendimento.

Metodo

La simulazione prevede un arto virtuale a tre giunti che si muove su di un piano bidimensionale di 335x225 pixel, con la spalla fissa in un punto. Ciascun giunto è controllato da una coppia di muscoli agonista-antagonista (un muscolo per la flessione e uno per l'estensione), e può aprirsi e chiudersi entro limiti simili a quelli dell'arto umano; l'area complessiva raggiungibile dall'estremità della mano viene quindi ad assumere la forma di una goccia (Fig. 79).

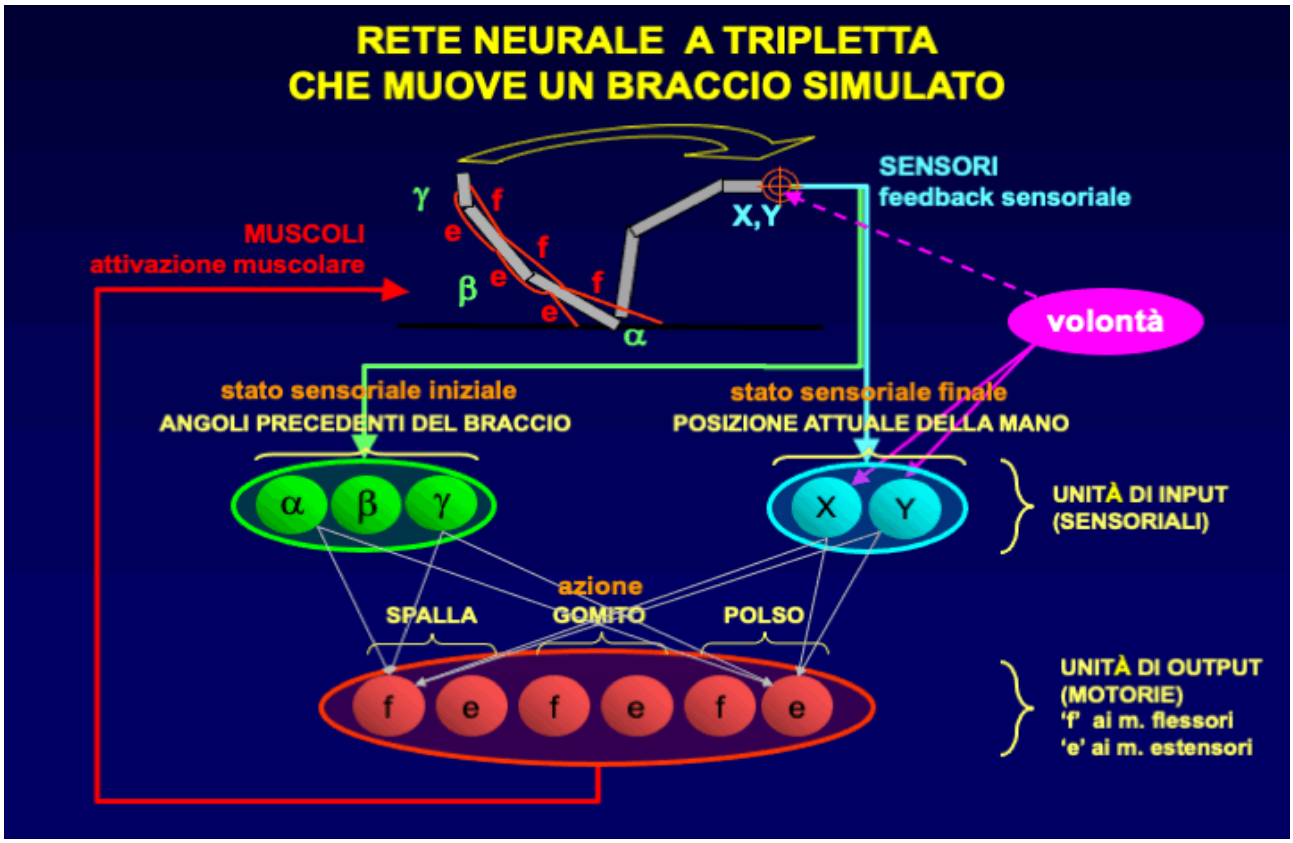


Fig. 80. Rappresentazione del controllo sensori-motorio del modello ARM.

La rete neurale è sottoposta ad apprendimento non supervisionato learning-by-doing. Questo consiste nell'apprendimento della correlazione tra l'azione eseguita dalla posizione iniziale alla posizione finale effettivamente raggiunta non considerando l'errore rispetto alla posizione desiderata. Per non affollare eccessivamente la figura non sono rappresentate le eventuali unità nascoste e tutte le connessioni; in effetti esistono tutte le connessioni dalle unità di input alle unità di output, incluse quelle passanti per eventuali unità nascoste.

Le attivazioni muscolari sono controllate da una rete neurale (Fig. 80), che riceve informazioni sensoriali sulla posizione dell'arto prima e dopo ogni movimento, e *comandi* da un sistema esterno che funge da volontà.

Sensori

La rete neurale riceve informazioni propriocettive dai 3 angoli dei 3 giunti, ed informazioni visive circa la posizione dell'estremità dell'arto nello spazio, per un totale di 5 unità di input della rete neurale: 3 propriocettive e 2 visive. Abbiamo attuato simulazioni con informazioni visive codificate in coordinate cartesiane (X, Y), ed altre con informazioni di tipo visivo codificate in coordinate polari (distanza ed angolo rispetto alla spalla).

Effettori

La rete neurale comanda l'apertura o chiusura dei 3 giunti tramite 2 muscoli per ciascun giunto: un muscolo estensore per l'apertura ed uno flessore per la chiusura, per un totale di 6 unità di output della rete neurale. Come le sensibilità, anche i muscoli sono simulati a un livello astratto: semplici motori lineari che aprono e chiudono le articolazioni, non muscoli a molla dotati di punti d'inserzione e di diagrammi tensione-lunghezza come in GAZE.

Volontà

Le 2 unità di input visive ricevono non solo informazioni sensoriali sulla posizione della mano, ma anche attivazioni (comandi) da un'entità, esterna alla rete neurale, che genera i punti-obiettivo che la rete neurale deve raggiungere con la mano. Nella realtà biologica essa risiede verosimilmente in altre aree del sistema nervoso; ma nella nostra simulazione consiste semplicemente di un generatore casuale di posizioni da raggiungere, a cui lo sperimentatore può sostituirsi in qualsiasi momento per imporre i suoi propri comandi.

Poiché le informazioni sensoriali visive circa la posizione dell'estremità dell'arto e i comandi dalla volontà convergono sulle medesime unità di input, anche i comandi dalla volontà devono essere in codifica sensoriale visiva; devono cioè definire la posizione finale desiderata della mano sul piano.

Rete neurale

La rete neurale per il controllo sensori-motorio è quindi costituita da 5 unità di input (3 propriocettive e 2 visive) e 6 unità di output (ciascuna delle quali determina l'attivazione di uno dei 6 muscoli), a cui si aggiunge un numero variabile di unità nascoste (da 0 a 10) a scelta dello sperimentatore.

Apprendimento

Il metodo di apprendimento qui applicato, non supervisionato, è quello definito learning-by-doing descritto nel cap. 28. In sintesi: il braccio inizialmente compie movimenti sbagliati rispetto al bersaglio proposto e i movimenti anche sbagliati vengono appresi (non si utilizza una valutazione dell'errore rispetto al punto desiderato, ma solo la reale posizione raggiunta rispetto alla posizione di partenza con

le forze utilizzate). Con il succedersi della presentazione di numerosi punti bersaglio casuali, e quindi di numerosi movimenti, nei pesi delle connessioni si viene ad implementare automaticamente e progressivamente una mappa sensori-motoria che consente movimenti sempre più corretti nel raggiungimento dei bersagli.

Rimandiamo la descrizione dettagliata dei meccanismi di apprendimento al nostro precedente libro *Coscienza artificiale* o al nostro sito. www.neurosoft.it.

Esperimenti

Abbiamo provato varie simulazioni, arrestando l'apprendimento quando l'errore medio (distanza tra punto-obiettivo desiderato e punto effettivamente raggiunto dall'estremità dell'arto) scendeva sotto i 5 pixel (errore = 1,5%).

Per vedere come le prestazioni cambiavano durante l'apprendimento abbiamo effettuato, prima dell'apprendimento e poi nuovamente dopo 5000 e dopo 30000 movimenti, un test di raggiungimento di 588 punti-bersaglio prefissati e uniformemente distribuiti su tutta l'area raggiungibile, partendo con l'estremità del braccio (mano) al centro dell'area.

Per mettere alla prova l'ipotesi accessoria che gran parte dell'efficacia motoria finale è determinata dalle capacità di generalizzazione abbiamo anche provato a impedire l'apprendimento in aree fino al 50% dell'intera area di lavoro, impedendo la propriocezione in queste aree, una sorta di *macchia cieca sensoriale*.

Risultati

In tutte le simulazioni il sistema ha costantemente raggiunto un buon controllo motorio dopo un numero variabile di movimenti da 10.000 a 30.000 (3-5 minuti su di PC di allora). La Fig. 81 mostra il miglioramento della capacità motoria della rete con l'esperienza. Nel riquadro in alto a sinistra è mostrata la distribuzione dei 588 punti-bersaglio; i tre riquadri successivi mostrano i corrispondenti punti raggiunti dalla rete rispettivamente al tempo zero, dopo 5000 movimenti, e dopo 30000 movimenti. Ovviamente, in presenza di una capacità motoria perfetta, i punti effettivamente raggiunti dovrebbero coincidere con quelli dei bersagli presentati.

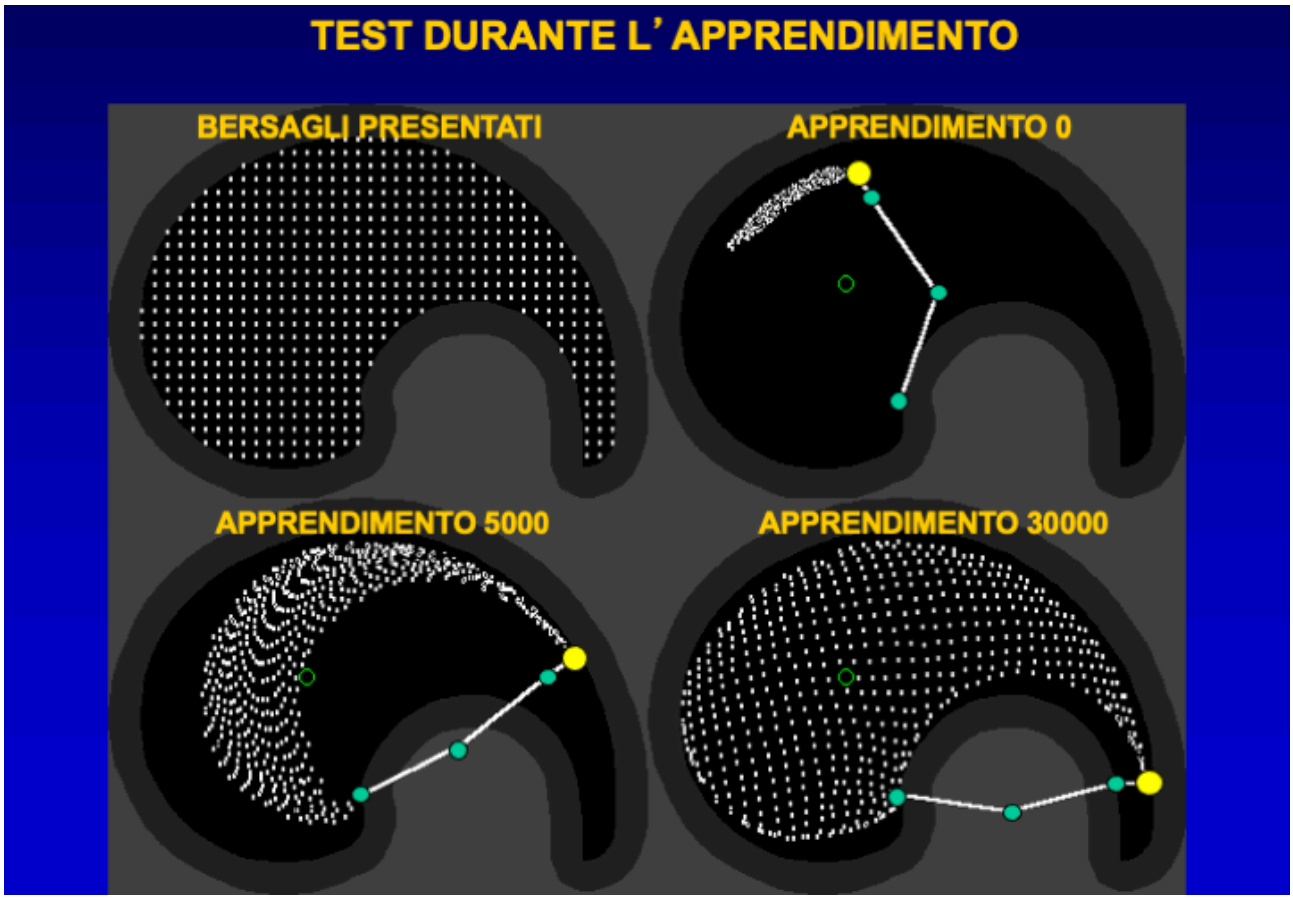


Fig. 81. Progressiva implementazione della mappa sensori-motoria nel corso dell'apprendimento. Il primo riquadro in alto a sinistra mostra la disposizione dei punti bersaglio che vengono presentati randomicamente, gli altri tre riquadri mostrano le posizioni raggiunte dal braccio artificiale durante l'apprendimento learning-by-doing.

Si nota che, prima dell'apprendimento, i punti raggiunti rappresentano un insieme contratto raggruppato nell'area corrispondente alle posizioni intermedie dei segmenti dell'arto. Via via che la rete muove l'arto e apprende, questo insieme progressivamente si espande e, dopo 30000 movimenti, copre abbastanza uniformemente l'area di lavoro, approssimando accettabilmente i punti bersaglio, con una concentrazione dell'errore residuo soprattutto nelle zone di estrema flessione e, particolarmente, di estrema estensione delle tre articolazioni. La distribuzione spaziale dell'errore ad apprendimento ultimato (errore medio inferiore all'1,5 %) è rappresentata in codice-colore nelle successive 4 figure ravvicinate (Fig. 82). Si confermano (figura in alto a sinistra) prestazioni buone o eccellenti in quasi tutta l'area, con una molto limitata concentrazione dell'errore nella coda della goccia (corrispondente alla massima apertura di tutte le articolazioni). Le altre tre figure mostrano l'effetto della macchia cieca sensoriale sull'apprendimento complessivo. Come si può osservare l'effetto non è rilevante, neanche all'interno stesso della macchia cieca, a conferma delle particolari capacità di generalizzazione della rete neurale che costituisce questo modello.

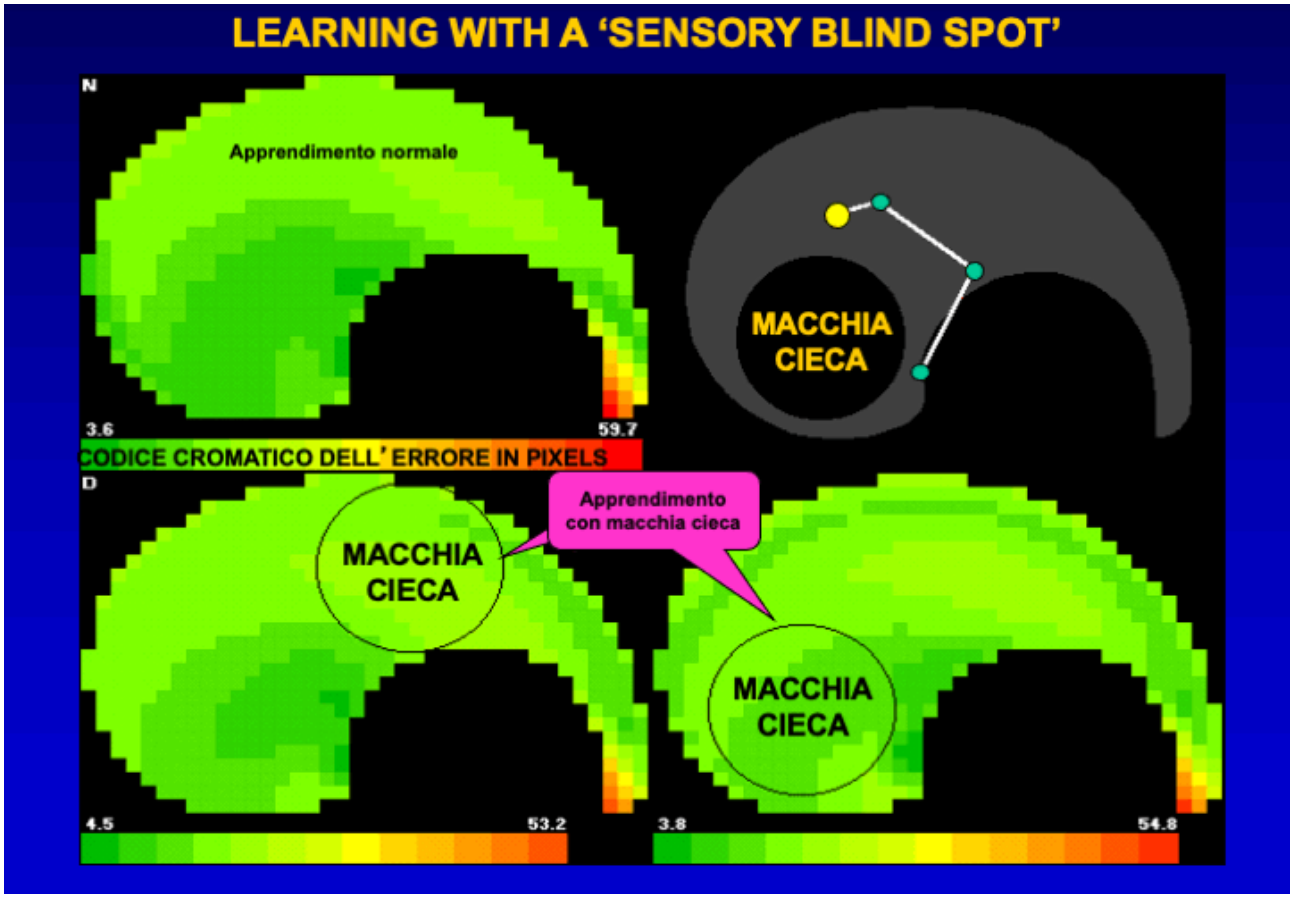


Fig. 82. Apprendimento senza e con *macchia cieca sensoriale*. Non si notano grandi differenze di errore anche all'interno della macchia cieca che indicano buone capacità di generalizzazione della rete neurale di controllo.

Discussione e conclusioni

La sperimentazione appare confermare sotto ogni aspetto l'attendibilità del modello learning-by-doing come modello dell'apprendimento motorio fenotipico umano e animale.

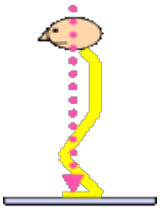
Circa la verifica delle capacità generalizzatorie della rete neurale learning-by-doing, la resistenza del modello alla introduzione della macchia cieca sensoriale rappresenta la dimostrazione più eclatante di tali capacità. Ma un'altra dimostrazione, meno appariscente ma persino più significativa, risiede nel numero di movimenti effettuati rispetto al totale dei movimenti possibili. Nello spazio motorio reale, tridimensionale e analogico, i movimenti possibili sono infiniti. Ma nello spazio bidimensionale e pixellizzato della nostra sperimentazione i movimenti sono molti, ma finiti. Per la precisione, essi sono oltre 300 milioni. Questo vuol dire che una rete che ha eseguito 30000 movimenti, come quella in figura, che ha raggiunto un basso livello di errore (1,5%), ha realmente effettuato meno di 1/10000 dei

movimenti possibili. E ciò nonostante mostra buone prestazioni su praticamente tutta l'area di lavoro. In altre parole, l'esplorazione casuale di meno di 1/10000 dei movimenti possibili è sufficiente ad apprendere adeguatamente il totale mappaggio sensori-motorio possibile di un arto a tre giunti (quindi notevolmente non lineare); e anche il raggruppare forzosamente i movimenti non apprendibili (macchia cieca sensoriale) entro aree persino superiori al 50% dell'intero spazio raggiungibile non degrada significativamente le prestazioni della rete.

Si noti che il feedback sensoriale dopo il movimento e i segnali provenienti dal sistema della volontà arrivano alle medesime unità, quelle dello stato finale. Questo implica che entrambi questi tipi di segnali devono essere codificati nello stesso modo, quindi la volontà deve presentare il suo comando alla rete sotto forma di rappresentazione sensoriale dello stato finale desiderato, non di rappresentazione motoria. La rete learning-by-doing è per questo, ripetiamo, una rete che impara a tradurre la codifica sensoriale in quella motoria; o, per dirla in termini più sofisticati, effettua il mappaggio dello spazio sensoriale nello spazio motorio (più brevemente, mappaggio sensori-motorio). Questo coincide con il Principio Ideo-Motorio di James secondo cui l'esecuzione delle azioni è innescata dalla rappresentazione (previsione implicita) delle loro immediate conseguenze sensoriali.

Questo modello, inoltre, presenta caratteristiche in comune con l'apprendimento motorio umano non solo dal punto di vista anatomico, ma anche funzionale. Una caratteristica che ci sembra particolarmente significativa è che l'unico modo a disposizione della volontà per privilegiare l'apprendimento di certi desiderati movimenti consiste nell'intensificarne la ripetizione, con conseguente maggiore esplorazione di quelle aree dello spazio sensori-motorio. Esattamente come nel movimento umano, repetita juvant, repetition makes perfect.

34. POSTURA
controllo della posizione eretta (anno 2001)



Introduzione

Sulla base delle positive esperienze effettuate con il modello di apprendimento motorio non supervisionato descritte in ARM, abbiamo pensato di verificare se un'analoga rete neurale artificiale con apprendimento learning-by-doing potesse consentire ad un modello bidimensionale di corpo umano schematizzato, simulato su computer, di apprendere autonomamente il mantenimento della posizione eretta anche con perturbazioni del sistema prodotte da oscillazioni improvvise della base di appoggio e improvvise spinte antero-posteriori sul modello.

L'apprendimento di questo compito motorio rappresenta una sfida particolare per il learning-by-doing, poiché il mantenimento della postura eretta, in particolare in un modello semplificato come questo, è quanto mai inadatto al learning-by-doing, in quanto qui paradossalmente l'obiettivo è non muoversi, ma mantenere una posizione più stabile possibile, ovvero learning by…*non doing*. Tuttavia in realtà i movimenti ci sono: quelli di compenso alle oscillazioni del corpo per mantenerlo eretto. Ma questi movimenti diminuiscono progressivamente in conseguenza dell'apprendimento, e quindi le perturbazioni esterne per inclinazione della base d'appoggio o per le spinte esterne, che provocano oscillazioni imprevedibili, accelerano l'apprendimento. Si potrebbe quindi dire *learning-by-swinging* o *by-falling*.

Metodo

Rispetto al modello ARM questa rete ha un unico compito motorio: mantenere costantemente la testa più alta possibile rispetto alla base d'appoggio. L'ambiente non è esclusivamente passivo (uno spazio da esplorare) come nel modello ARM, ma interviene attivamente a perturbare l'equilibrio del sistema con improvvise variazioni dell'inclinazione della base d'appoggio, e 'spinte sul corpo' in avanti o indietro, con intervalli e intensità casuali regolabili dallo sperimentatore.

Sensori

La fisica e il sistema sensoriale che la rete si trova a dover gestire sono ora più complessi che in ARM. Il modello bidimensionale di corpo umano utilizzato è costituito da cinque segmenti (piede-gamba-coscia-tronco-testa) articolati tramite quattro giunti (caviglia-ginocchio-bacino-collo). Il sistema

sensoriale, oltre alle informazioni visive e a quelle propriocettive delle articolazioni come nel modello ARM, comprende anche informazioni propriocettive dalla pianta dei piedi (posizione della proiezione verticale del baricentro sulla base di appoggio) e informazioni vestibolari sull'inclinazione assoluta della testa (direzione del vettore gravità rispetto all'asse verticale della testa) e sulla sua accelerazione. Per una migliore risoluzione ciascuna informazione è fornita a due unità di input anziché a una come in ARM, per un totale di 24 unità di input.

Effettori

Ogni segmento del corpo è soggetto alla forza di gravità e all'azione di muscoli (un muscolo flessore e un estensore per ogni articolazione come nel modello braccio). La fisica (simulata) complessiva del sistema, pur semplificata, prende in considerazione, oltre ai fattori gravitazionali e muscolari, anche l'inerzia dei segmenti, la rigidità delle articolazioni, e le forze elastiche insorgenti dalla flessione o estensione di ogni articolazione. Il movimento comunque è limitato al piano sagittale del modello posturale. Le unità di output sono 8, una per ciascuno dei due muscoli antagonisti (flessore ed estensore) di ciascuna delle 4 articolazioni.

Volontà

Come in ARM, i comandi della volontà, qui corrispondenti al compito di mantenere la testa più in alto possibile, sono inviati ad unità di input che ricevono anche informazioni sensoriali: qui alle 2 unità che ricevono informazioni sulla altezza della testa rispetto alla base d'appoggio e simulano una informazione visiva.

Rete neurale

La rete neurale per il controllo sensori-motorio (Fig. 83) è costituita da 24 unità di input (8 per gli angoli delle articolazioni, 2 per la posizione del baricentro, 4 per la posizione della testa, 4 per l'inclinazione della testa, e 6 per l'accelerazione della testa, di cui 2 per la direzione e 4 per l'intensità) e 8 unità di output (una per ciascuno degli 8 muscoli), a cui si aggiunge un numero variabile di unità nascoste (da 0 a 10) a scelta dello sperimentatore.

Apprendimento

Il meccanismo di apprendimento, come per ARM, è quello del learning-by-doing, in cui le configurazioni da apprendere sono fornite dai movimenti che il modello compie anche casualmente. Ribadiamo che non occorre quindi costruire preliminarmente alcun set di esempio, né è richiesto alcun supervisore esterno: l'apprendimento avviene per esperienza.

Esperimenti

Abbiamo provato varie simulazioni, con differenti frequenze ed intensità delle perturbazioni esterne (oscillazioni della base d'appoggio e spinte sul corpo), e con il corredo sensoriale completo o escludendo una o due delle quattro sensorialità (visiva, propriocettiva articolare, propriocettiva dalla pianta dei

piedi, vestibolare), arrestando la simulazione quando l'individuo risultava non cadere più per 10000 movimenti consecutivi.

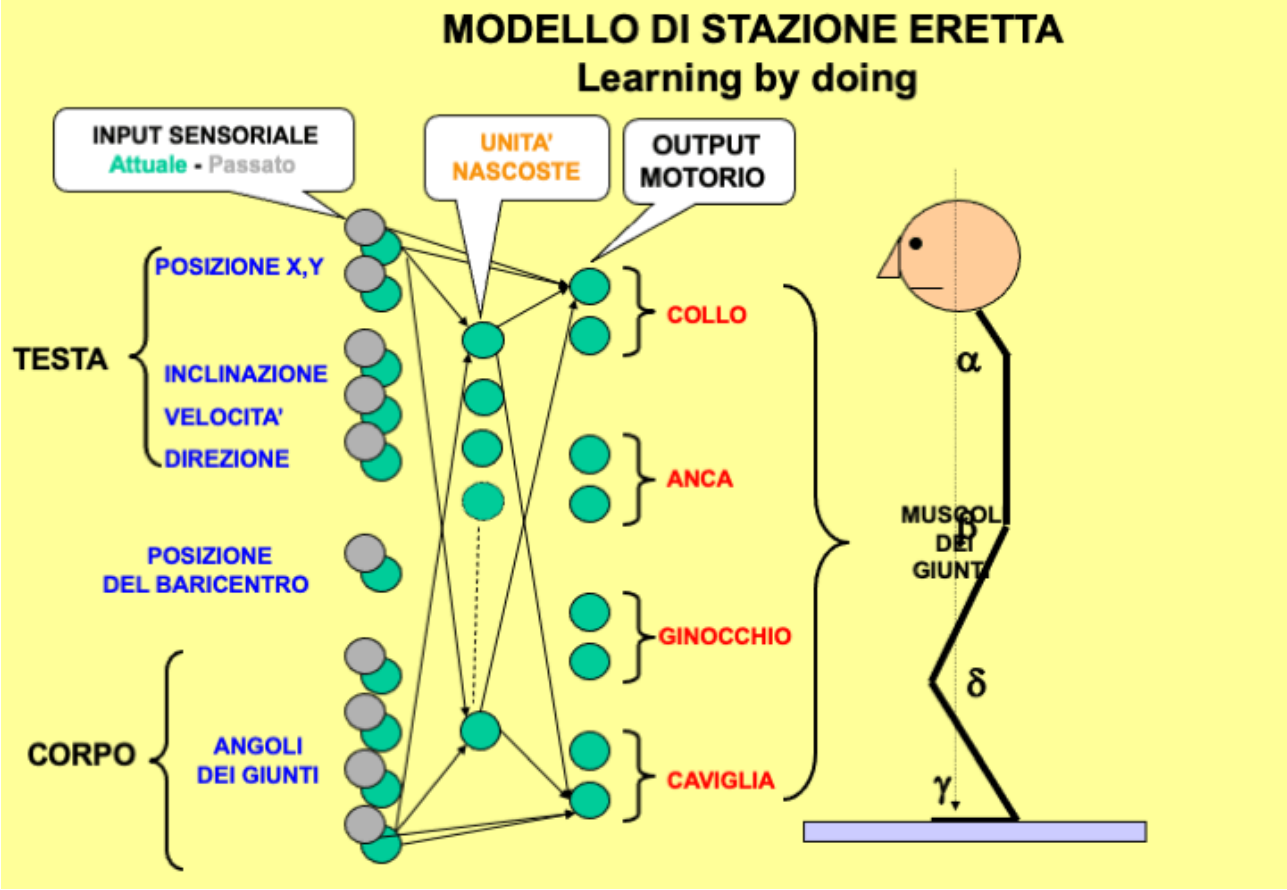


Fig. 83. Rappresentazione del controllo sensori-motorio del modello POSTURA. Per non affollare eccessivamente la figura non sono rappresentate tutte le unità di input e nascoste e tutte le connessioni; in effetti esistono tutte le connessioni dalle unità di input alle unità di output, incluse quelle passanti per eventuali unità nascoste.

Risultati

In tutte le simulazioni il sistema ha appreso rapidamente (in circa 50000-70000 movimenti, pochi minuti su di un comune PC) a mantenere la postura eretta e a controbilanciare efficacemente le improvvise oscillazioni della base d'appoggio e le spinte sul corpo. Tali perturbazioni sono risultate *favorire* l'apprendimento, evidentemente per aumento dei movimenti e conseguente loro apprendimento. Il filmato in Fig. 84 mostra le prestazioni del sistema prima e dopo l'apprendimento. La prestazione nel filmato prima dell'apprendimento appare migliore di quanto sia in realtà, poiché gli sbandamenti non vengono mostrati fino alla caduta: appena il baricentro del corpo esce dalla base d'appoggio per un tempo programmato (e quindi l'individuo cadrà), il programma fa ripartire l'individuo da una posizione casuale con il baricentro entro la base d'appoggio.

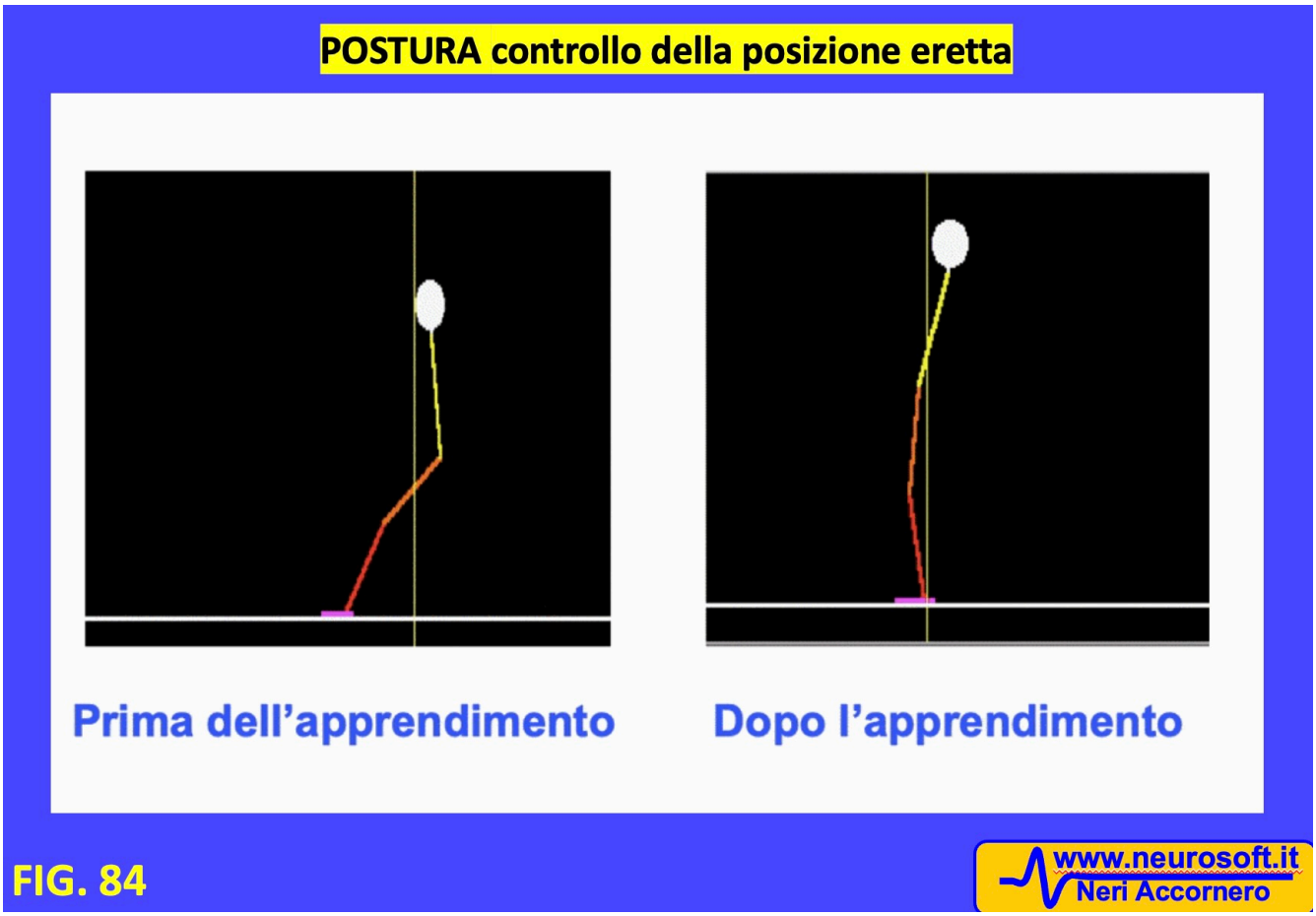


Fig. 84 (animata). Nel riquadro a sinistra il comportamento del modello prima dell'apprendimento, nel riquadro a destra dopo l'apprendimento.

Le varie sessioni di apprendimento hanno raggiunto lo scopo in tempi diversi e con attitudini posturali finali leggermente differenti per flessione delle ginocchia, del bacino o del capo, suggerendo che la posizione eretta massima con tutti i segmenti articolari allineati verticalmente non sia la condizione migliore per compensare le perturbazioni esterne. Tale comportamento, oltre che efficace, appare compatibile con le osservazioni delle strategie posturali reali umane.

Com'era da attendersi, le varie modalità sensoriali si sono mostrate ridondanti: escluderne alcune non ha compromesso l'apprendimento (sebbene abbia potuto rallentarlo). Le sensibilità più importanti in questo senso sono apparse e essere quella relativa alla proiezione del baricentro sulla base di appoggio e quella relativa agli angoli delle articolazioni.

Discussione e conclusioni

Il learning-by-doing si è confermato un modello di apprendimento motorio versatile, efficace anche nelle simulazioni di compiti motori molto diversi quali il muovere intenzionalmente un braccio o il mantenere la stazione eretta, e capace di funzionare anche con informazioni sensoriali differenti.

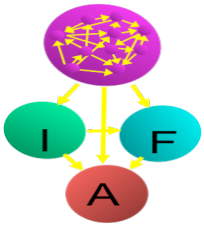
Il mantenimento della posizione eretta si può presumere che sia un compito motorio largamente espletato per apprendimento genetico piuttosto che per apprendimento fenotipico, e che il learning-by-doing intervenga soltanto a calibrare le strutture e i circuiti competenti (essenzialmente midollari e cerebellari) sugli effettori e le caratteristiche del corpo (dimensioni e forze) nel quale vengono a trovarsi. In più, nella realtà biologica vi sono innumerevoli occasioni di auto-perturbazioni dell'equilibrio (si pensi semplicemente agli effetti del camminare, muovere le braccia, ruotare il tronco, flettersi e muovere oggetti ecc.) che provocano instabilità e quindi necessità di apprendimento, e che invece mancano nel modello semplificato adottato in questa simulazione.

L'osservazione di queste simulazioni indica comunque che caratteristiche ambientali e meccanismi evolutivi sono condizioni necessarie e sufficienti per lo sviluppo di comportamenti motori anche sofisticati. Il modello del learning-by-doing appare versatile e fecondo di applicazioni. Di conseguenza abbiamo pensato che, se questo modello è efficace nei meccanismi sensori-motori, potrebbe anche essere utilizzato per simulare e forse comprendere altre caratteristiche e comportamenti del sistema nervoso biologico, come ad esempio i comportamenti cognitivi. Questo è l'oggetto del prossimo capitolo.

35. ROOMS

Pensiero! (anno 2004)

RETI NEURALI CHE EVOLVONO PER *IMMAGINARE E……*



Introduzione

In questa simulazione estendiamo il modello della tripletta sensori-motoria per mostrare che questo modello, fornito di pochi elementi e collegamenti aggiuntivi, può acquisire evolutivamente la capacità di produrre un comportamento intenzionale di tipo predittivo se immerso in un ambiente che premia un tale comportamento.

Un'azione volontaria è un'azione della quale prevediamo gli effetti (Parisi, 2006). La capacità di prevedere è basata su memorie di esperienze passate. Ipotizzando che queste memorie siano contenute nelle aree associative e possano essere richiamate da altri settori (in particolare dalle aree prefrontali), abbiamo deciso di verificare se la selezione evolutiva fosse in grado di produrre una rete neurale capace di utilizzare la memoria per prevedere i risultati di un'azione e sfruttare queste previsioni per attuare comportamenti vantaggiosi. Anche se molto semplificata, questa simulazione rappresenta un modello innovativo per lo studio del comportamento intenzionale predittivo.

La descrizione che segue è molto tecnica e complessa pur non utilizzando formulazioni matematiche e può scoraggiare il lettore, ma non è necessario seguirla compiutamente, serve per fornire un'idea della complessità del sistema allestito e per farne comprendere il funzionamento ai più esperti in connessionismo. La parte successiva con la descrizione delle sperimentazioni effettuate con le illustrazioni dovrebbe risultare più facilmente comprensibile.

Metodo

Sinteticamente, una popolazione di 100 reti neurali (agenti) viene fatta agire in un ambiente in cui per produrre comportamenti utili è vantaggioso ricordare le esperienze passate e prevedere i risultati delle azioni future. Ogni rete neurale è costituita da due componenti: una memoria *associativa,* che conosce (ricorda) l'ambiente, ma non può agire; ed una rete *direttiva*, che può evocare ricordi dalla memoria ed agire, sfruttando quei ricordi per scegliere le azioni adatte. La memoria è precostituita, perfetta, uguale per tutti gli agenti e invariabile nel tempo, una sorta di memoria genetica (alla fine del capitolo spieghiamo la motivazione di questa scelta). Le reti direttive inizialmente hanno una struttura casuale diversa per tutti gli agenti, e sono fatte evolvere con algoritmo genetico (cap. 27) che modifica il numero

e le caratteristiche delle loro unità e connessioni, sia interne che con la memoria, verso la massimizzazione della fitness.

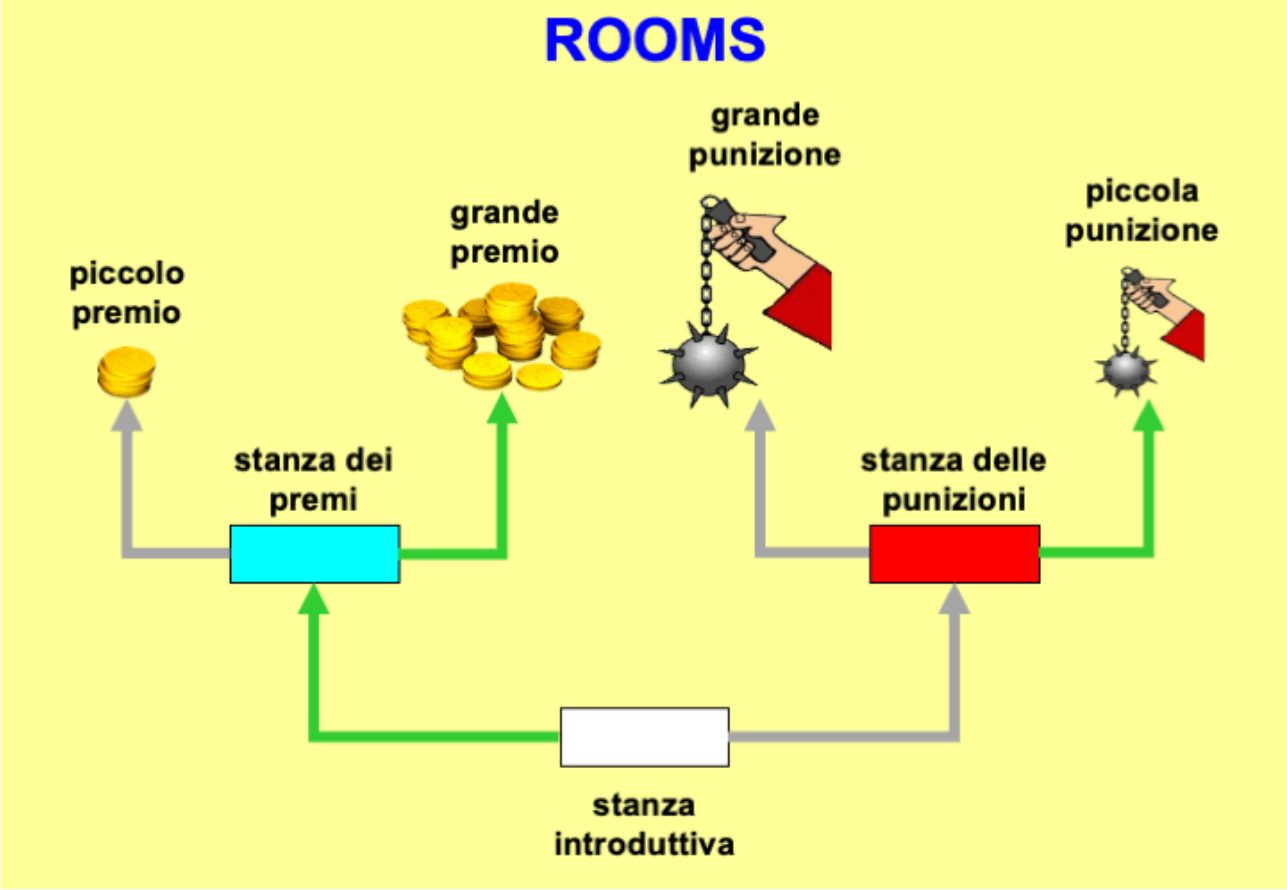


Fig. 85. Uno dei 24 labirinti della simulazione ROOMS. Nella camera blu l'uscita a sinistra determina un piccolo aumento della fitness dell'agente (piccolo premio); quella a destra un grande aumento (grande premio); nella camera rossa l'uscita a sinistra determina una grande diminuzione della fitness (grande punizione); quella a destra una piccola diminuzione (piccola punizione). In verde le uscite-azioni migliori (adatte). I 24 labirinti differiscono per i colori delle stanze e le posizioni dei premi e delle punizioni, coprendo tutte le permutazioni possibili escluse quelle in cui un premio ed una punizione sarebbero accessibili dalla stessa stanza.

Ambiente

L'ambiente è composto da 24 semplici labirinti a triplo T, ciascuno con 4 uscite che danno agli agenti 4 risultati di fitness di diversi valori: 2 positivi (premi) e 2 negativi (punizioni). Ogni labirinto è composto da tre stanze, ognuna con due porte di uscita (Fig. 84). In ogni stanza solo tre azioni sono possibili per gli agenti: prendere la porta a sinistra, a destra, rimanere fermi. Non è possibile riprendere la porta da cui si è entrati ossia tornare indietro. Nella prima stanza, la stanza introduttiva, una porta conduce alla stanza dei premi, l'altra porta alla stanza delle punizioni. Nella stanza dei premi una porta fa ottenere un grande premio, l'altra un piccolo premio. Nella stanza delle punizioni una porta dà una grande

punizione, l'altra una piccola punizione. Ognuna delle tre stanze ha un codice binario sensoriale diverso (per lo sperimentatore un colore rosso bianco o blu). Ciascuno dei 24 labirinti è caratterizzato da una combinazione unica di colori delle stanze e di risultati delle porte. I 24 labirinti coprono tutte le possibili permutazioni di colori delle stanze ed effetti delle porte, escluse le combinazioni in cui un premio ed una punizione sarebbero accessibili dalla stessa stanza.

Ogni agente può percepire il colore della stanza in cui si trova, ma non sa se quella sia la stanza introduttiva o quella dei premi o quella delle punizioni, fino a quando la sua memoria non rievoca il ricordo del risultato di una porta di quella stanza. La rete direttiva può anche indurre la memoria a rievocare il ricordo di una stanza diversa da quella in cui l'agente si trova, capacità che vedremo essere molto importante.

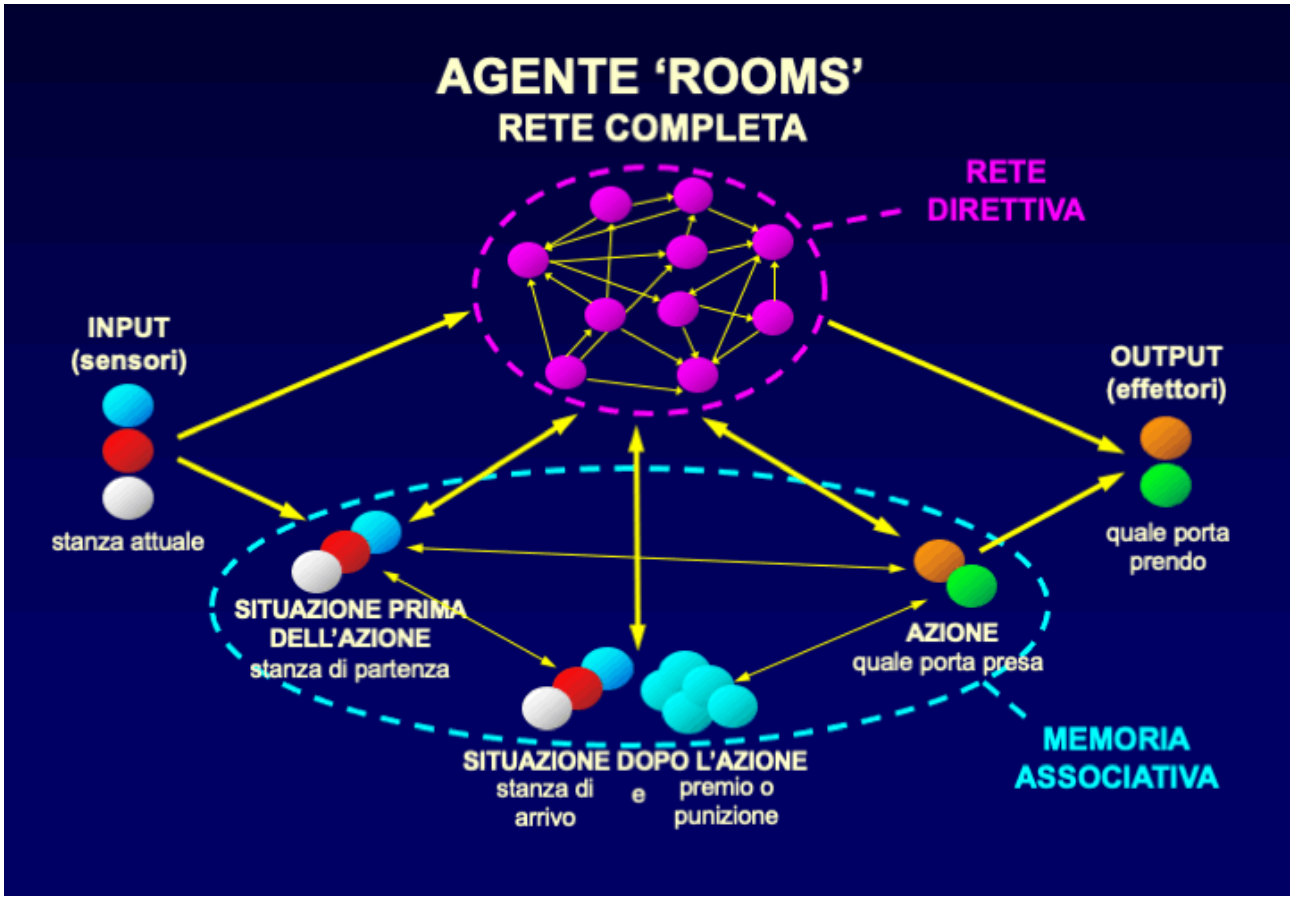


Fig. 86. Rete-agente del modello ROOMS.

Agenti

Il sistema agente (Fig. 86) è costituito da un gruppo di unità di input (sensorialità), un gruppo di unità di output (azione), e, come già anticipato, due reti neurali frapposte fra l'input e l'output: una memoria

associativa a tripletta che funziona da memoria fenotipica del labirinto nel quale di volta in volta l'agente è immesso, ed una rete neurale direttiva che riceve i ricordi della memoria, genera le azioni, e può anche indurre la memoria a rievocare ricordi relativi ad una stanza diversa da quella in cui l'agente si trova effettivamente.

Rispetto al modello a tripletta classico descritto nel cap. 28 ed utilizzato nei modelli ARM e POSTURA qui le unità di input e di output sono duplicate in modo che quelle di memoria siano attivabili dalla rete direttiva senza interferire con l'input e l'output effettivi-reali. Con questa architettura la rete a tripletta può generare triplette virtuali come descritto nel cap. 28 *Learning-by-doing*, sezione *Generalizzazioni del modello – Triplette virtuali e previsione*. La rievocazione in memoria del ricordo di una stanza diversa da quella in cui l'agente si trova (attivabile solo ad opera della rete direttiva) costituisce di fatto un'*immaginazione*, ed in questi agenti la distinzione fra immaginazione e realtà menzionata nei capitoli 6 e 27, sezione *Memorie associative artificiali*, è insomma ottenuta duplicando le unità coinvolte: quelle direttamente collegate con l'esterno rappresentano la realtà, su quelle della rete a tripletta si formano le immaginazioni/ricordi.

Ogni agente è testato in solitario, indipendentemente dagli altri agenti, in tutti i 24 labirinti, tre volte per ogni labirinto: facendolo partire randomicamente una volta nella stanza dei premi, una volta nella stanza delle punizioni, ed una volta nella stanza introduttiva Prima di essere inserito in ciascun labirinto l'agente viene dotato, nella sua rete a tripletta, di una memoria fenotipica di quel labirinto come se l'avesse già interamente esplorato. Tale memoria è preconfezionata, identica per tutti gli agenti e diversa per ciascun labirinto. Se in una stanza l'agente non agisce entro un tempo massimo prestabilito il test viene concluso con una punizione prestabilita. La fitness complessiva finale è data dalla somma algebrica dei premi e delle punizioni che l'agente ha ottenuto nei 24 labirinti.

Sensori

Il gruppo di input è costituito da tre unità neurali binarie che codificano il colore (blu, rosso o bianco) della stanza in cui l'agente si trova, ciascuna unità che codifica un colore possibile come stato **1 e 0.** Queste sono semplici unità lineari, che attraverso connessioni di peso unitario passano inalterati i loro valori di attivazione alle unità di memoria-tripletta che codificano la situazione (stanza) prima dell'azione, ed alle unità della rete direttiva a cui sono collegate. La rete direttiva può comunque sovrascrivere sulle unità di memoria i valori provenienti dalle unità di input con valori immaginati (0 o 1) da essa generati.

Effettori

Il gruppo di output è costituito da due unità neurali che codificano l'azione che l'agente esegue: l'attivazione della prima unità fa prendere all'agente la porta a sinistra, la seconda la porta a destra, e l'attivazione di entrambe o di nessuna lo fa rimanere fermo. Le unità di output ricevono connessioni (e quindi comandi) solo dalla rete direttiva. La rete a tripletta ha così memoria degli effetti delle diverse azioni nelle diverse stanze, ma non può agire; la rete direttiva può agire, ma per farlo nel modo migliore deve prima interrogare la memoria per conoscere (ricordare) gli effetti delle diverse azioni.

Rete di memoria associativa a tripletta

La struttura della rete a tripletta è simile al modello descritto nel cap. 28 *Learning-by-doing* ed utilizzato nei modelli ARM (cap. 33) e POSTURA (cap. 34), ma qui tutte le unità hanno connessioni bidirezionali fra tutti e tre i gruppi di unità, in modo che la rete funzioni come memoria associativa e rievochi triplette (virtuali) come descritto nel cap. 28 in *Generalizzazioni del modello – Triplette virtuali e previsione*. Sono inoltre unità binarie, con valore di attivazione soltanto 0 o 1.

I tre gruppi della tripletta sono costituiti rispettivamente da tre, otto, e due unità: tre per il ricordo della situazione prima dell'azione (la stanza di partenza), otto per il ricordo della situazione dopo l'azione (la stanza di arrivo ed il premio o la punizione ottenuti), e due per il ricordo dell'azione effettuata. Le stanze e l'azione sono codificate come nell'input e nell'output: tre unità per il colore della stanza e due unità per il prendere la porta di sinistra o di destra o restare fermi. I premi e le punizioni sono codificati in cinque unità indicanti grande premio, piccolo premio, nulla, piccola penalità e grande penalità. Le tre unità codificanti la stanza di partenza ricevono informazioni dalle unità di input sul colore della stanza in cui l'agente si trova, ma le loro attivazioni possono differire da quelle delle unità di input in quanto influenzate anche dalle altre unità di memoria e dalle unità della rete direttiva. Le due unità codificanti l'azione non inviano attivazioni anche alle due unità di output: quest'ultime (che determinano l'azione effettivamente attuata) ricevono connessioni e quindi comandi solo dalla rete direttiva.

Rete direttiva

La rete direttiva è una rete neurale non stratificata la cui costituzione è determinata dai processi evolutivi: numero di unità, numero e pesi delle connessioni con le unità di ingresso, con le unità di memoria e con le unità di uscita. Essa può richiedere alla memoria ricordi sul labirinto inviandole rappresentazioni sensoriali parziali non corrispondenti alla sensorialità attuale. Ad es., innescare la memoria con il colore di una stanza e la scelta di una porta, fa sì che la memoria completi la combinazione aggiungendo l'effetto (colore della stanza destinazione o valore del premio/punizione) di prendere quella porta.

Apprendimento

Le reti direttive degli agenti sono sottoposte ad apprendimento genetico tramite algoritmo genetico come in GAZE: alla fine di ogni generazione, dopo che tutti gli agenti sono stati testati in tutti i labirinti, le loro prestazioni in solitario sono messe a confronto, e gli agenti sono riprodotti per la generazione successiva, dando ai migliori un numero di discendenti maggiore rispetto agli altri e mutando ed incrociando a caso i discendenti. A parità di fitness totale sono favoriti nella riproduzione gli agenti che hanno agito più rapidamente.

Esperimenti

Abbiamo simulato una popolazione costituita da un numero fisso e costante di 100 agenti. Come criteri di fine simulazione abbiamo assunto il 95% di azioni corrette (nella stanza dei premi prendere la porta del grande premio; nella stanza delle punizioni prendere la porta della piccola punizione; nella stanza

introduttiva prendere la porta che conduce alla stanza dei premi) in tutte le stanze di tutti i labirinti, o 1000 generazioni senza miglioramento maggiore dell'1%. All'inizio della simulazione la rete direttiva di ogni agente è stata inizializzata con un numero casuale di unità tra 2 e 48 e con connessioni di peso casuale da -1 a +1. In ogni generazione ciascun agente è stato testato singolarmente nei 24 labirinti, tre volte per ogni labirinto (v. Agenti). Alla fine di ogni generazione, dopo che tutti gli agenti hanno eseguito tutti i test, gli agenti sono stati riprodotti per la generazione successiva, sempre in numero totale di 100, in base al loro punteggio finale di fitness, con gli agenti migliori riprodotti in maggiore quantità degli altri e mutando ed incrociando a caso i discendenti.

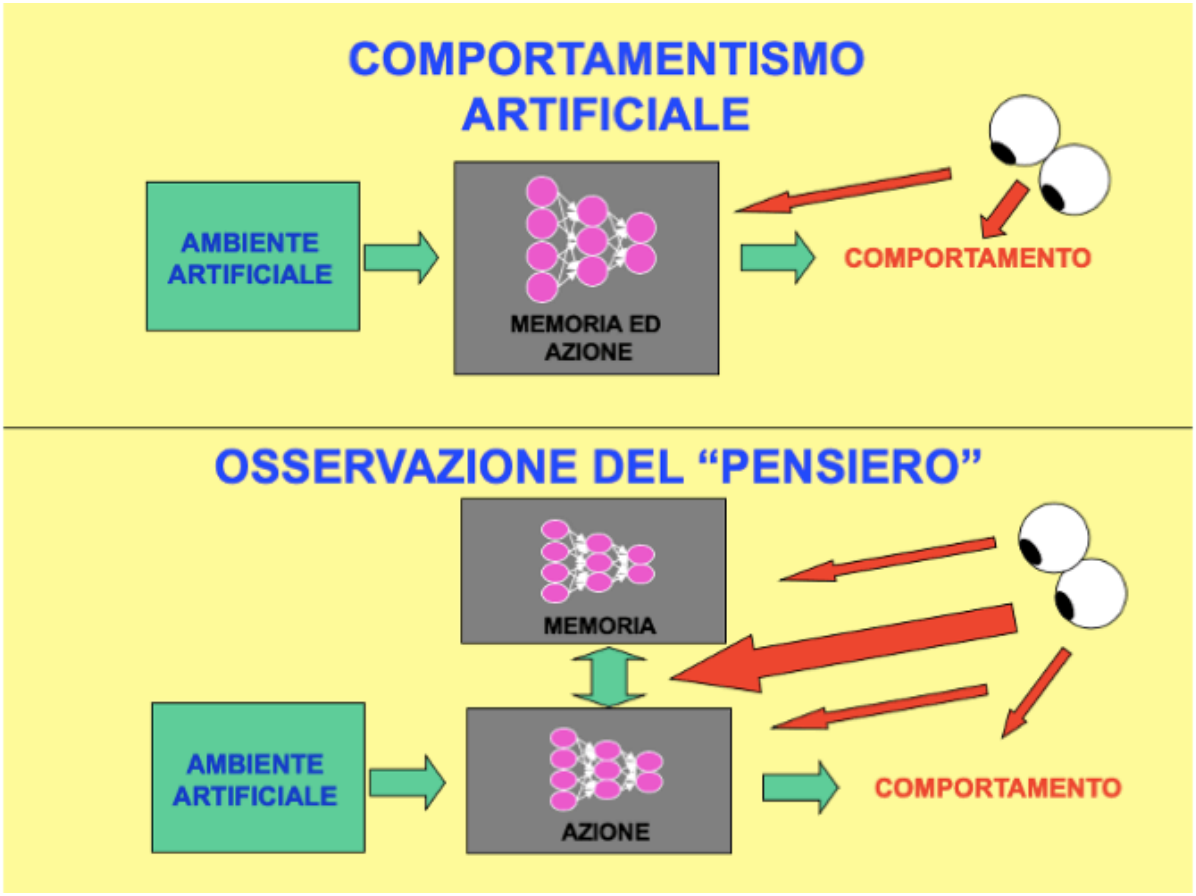


Fig. 87. Il modello ROOMS consente di visualizzare lo scambio d'informazioni tra rete direttiva e la memoria associativa che contiene le informazioni del labirinto nel quale il modello è immesso.

Abbiamo attuato varie simulazioni con diversi parametri dei valori iniziali casuali e dei premi e punizioni, finché una popolazione non ha soddisfatto il criterio finale del 95% di azioni corrette. A questo punto abbiamo isolato l'agente migliore e lo abbiamo nuovamente testato in tutti i labirinti, analizzando le interazioni tra la sua rete direttiva e la memoria per valutare la strategia di *pensiero* della rete direttiva (la sequenza di rievocazioni da essa indotte nella memoria): una sorta di *lettura della mente* (Fig. 87).

Inoltre, per verificare la nostra assunzione che il successo della popolazione si basasse sull'interazione tra la rete direttiva e la memoria, abbiamo condotto una seconda simulazione con una popolazione di

controllo identica alla prima tranne per il fatto di non avere connessioni dalla rete direttiva alla memoria (Fig. 88): una sorta di *lobectomia.*

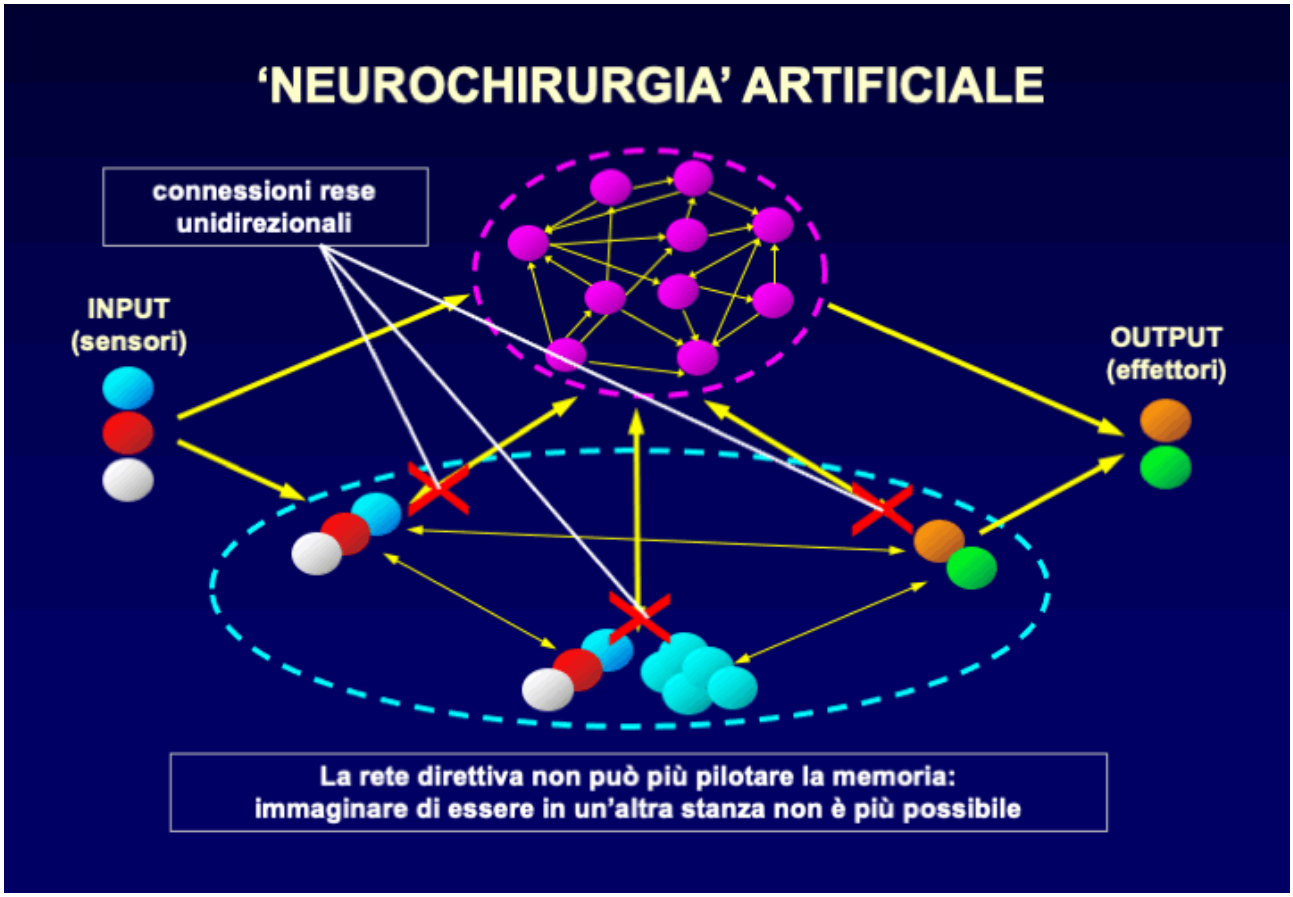


Fig. 88. *Lobectomia artificiale*. Le X rosse indicano le connessioni interrotte. La rete a tripletta è innescata solo dall'input sensoriale, per cui può rievocare solo ricordi riguardanti la stanza in cui l'agente effettivamente si trova. L'immaginazione è abolita.

Risultati

La popolazione normale ha raggiunto in circa 1000 generazioni quasi il 100% di azioni corrette nelle stanze dei premi e delle punizioni, ed in 13000 generazioni il 95% di azioni corrette nella stanza introduttiva. A questo punto dell'evoluzione la rete direttiva risultava di 30 unità in tutti gli agenti. Il percorso evolutivo della popolazione è rappresentato nei tre riquadri superiori di Fig. 89, in forma di traccia colorata dal rosso al verde (in rosso le generazioni più antiche, in verde le più recenti). Ogni tratto della traccia rappresenta la proporzione fra azioni giuste e sbagliate attuate dagli agenti in una generazione, con le azioni riguardanti la porta di sinistra riportate sull'asse verticale e quelle riguardanti la porta di destra sull'asse orizzontale, così che ogni azione giusta porta la traccia verso destra o verso l'alto, ogni azione sbagliata verso sinistra o verso il basso. Il punto centrale rappresenta il 50% di azioni giuste e 50% di azioni sbagliate, corrispondente ad azioni sostanzialmente casuali.

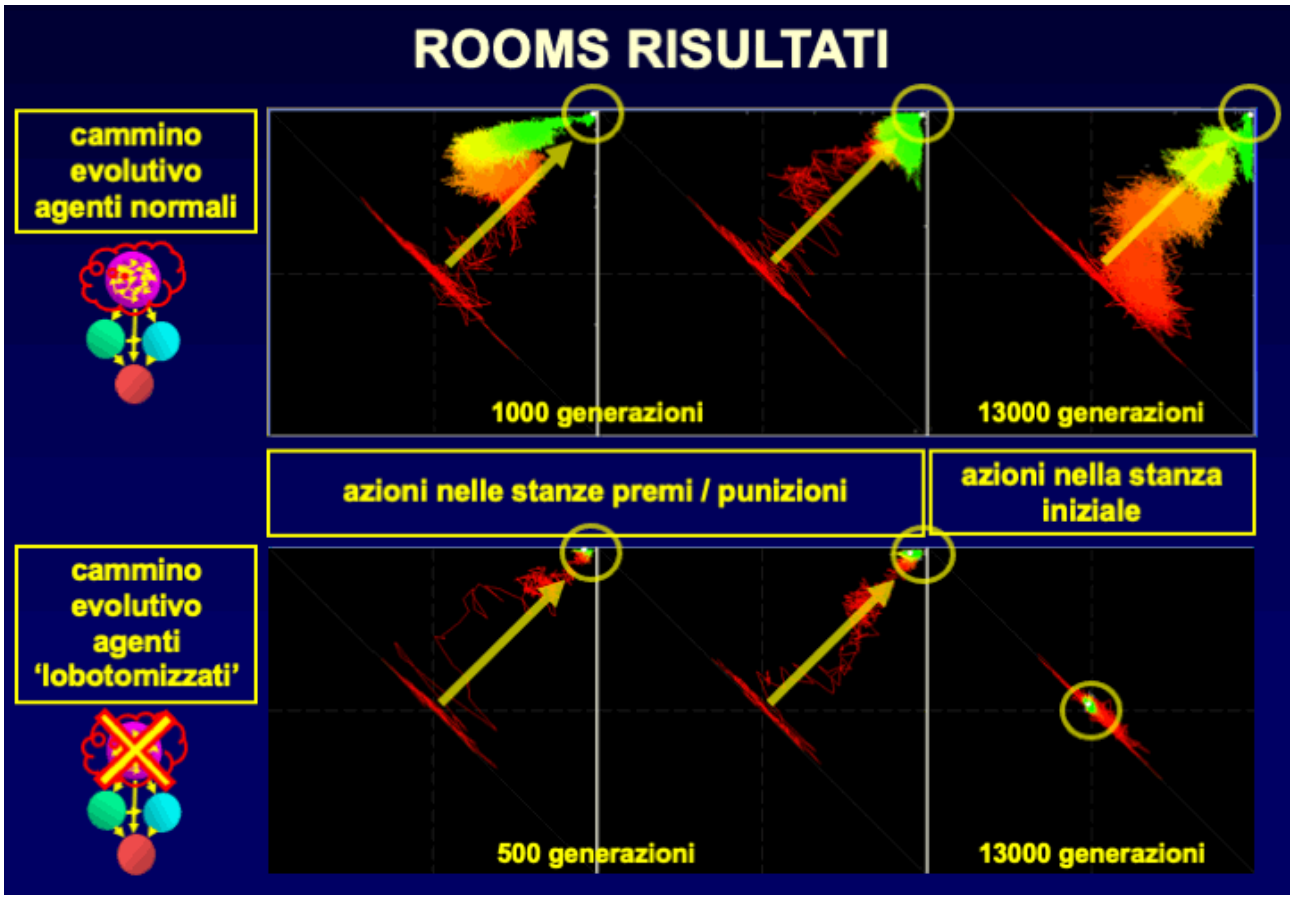


Fig. 89. Percorso evolutivo degli agenti ROOMS. Riquadri superiori: popolazione normale; riquadri inferiori: popolazione priva di connessioni dalla rete direttiva alla memoria. In ogni riquadro: asse orizzontale: percentuale di azioni corrette per la porta a destra (tutti gli agenti in tutti i labirinti); asse verticale: percentuale di azioni corrette per la porta a sinistra. In ogni riquadro il punto centrale corrisponde quindi al 50% di azioni corrette per entrambe le porte (azioni completamente casuali); l'angolo in alto a destra al 100% di azioni corrette per entrambe le porte (obiettivo ideale dell'evoluzione). Riquadri a sinistra: azioni nelle stanze dei premi (tutti i labirinti); riquadri centrali: azioni nelle stanze delle punizioni; riquadri a destra: azioni nelle stanze introduttive. Tratti colorati: risposte medie delle varie generazioni. In verde le generazioni più recenti, in rosso le più antiche.

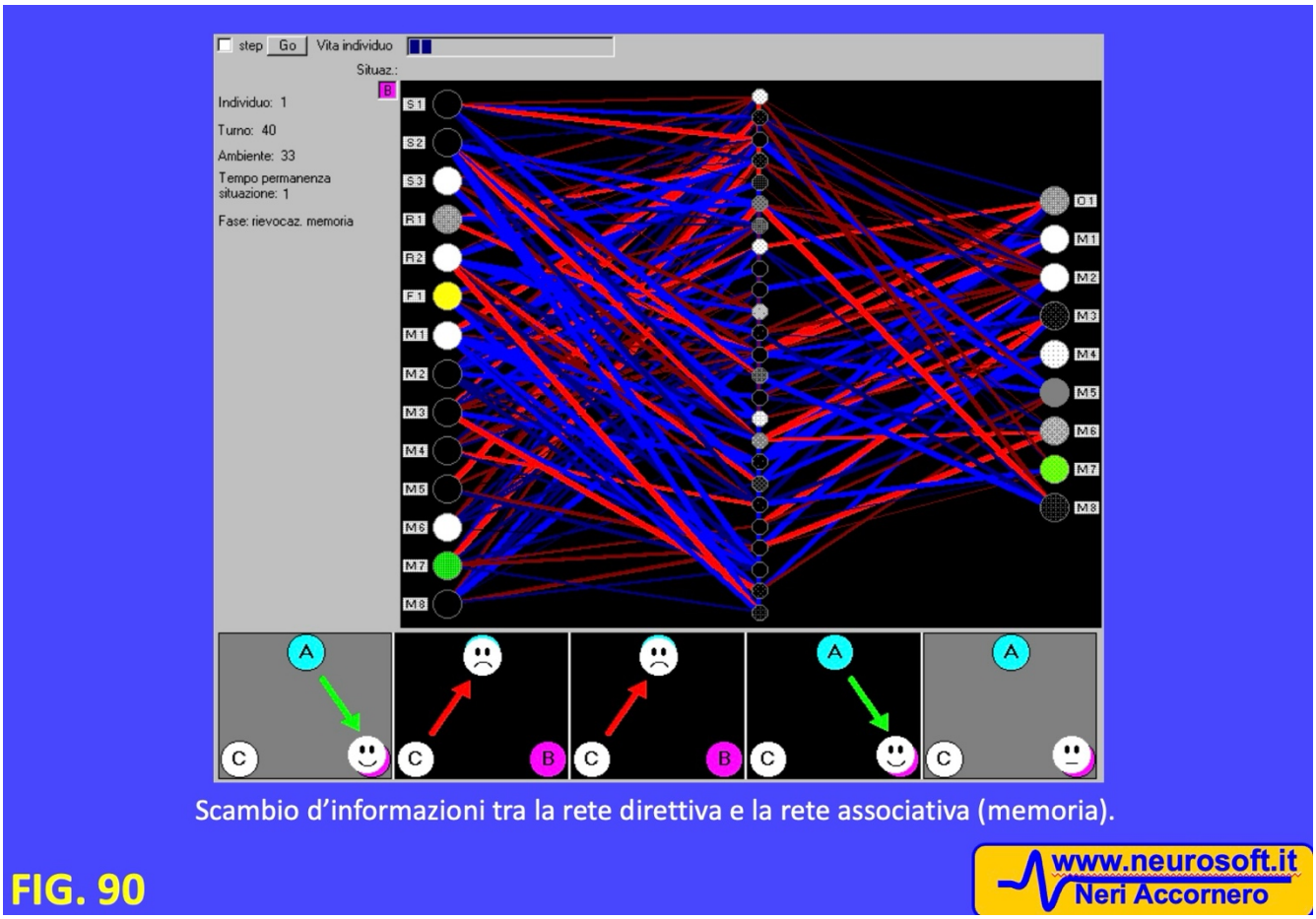


Fig. 90 (animata). Scambio d'informazioni tra la rete direttiva e la rete associativa (memoria).

La Fig. 90 mostra la *lettura della mente* dell'individuo migliore dell'ultima generazione (ad evoluzione avvenuta dopo 13000 generazioni, quando le reti erano comunque tutte ormai molto simili ed efficienti, con una strategia di ragionamento standardizzata ed uniforme). In basso nella figura, la sequenza d'immaginazioni-rievocazioni richieste dalla rete direttiva alla memoria nella strategia scovata dall'evoluzione per decidere le azioni corrette. Una descrizione più esaustiva si trova nel nostro precedente libro. Di seguito riportiamo la *traduzione in linguaggio corrente* della strategia rilevata da questa analisi.

In questo esperimento la rete direttiva ha sviluppato evolutivamente, in alcune ore, una strategia operativa, consistente in una sequenza di tre domande standardizzate, che pone alla sua memoria e che le consente di raggiungere sempre il miglior risultato in qualunque labirinto di questo tipo venga a trovarsi.

La **prima domanda** è sempre: "**Cosa succede se nella stanza in cui mi trovo prendo la porta di sinistra?"**

Primo caso: l'agente è in una stanza dei premi o delle punizioni

Se l'agente si trova già in una stanza dei premi o delle punizioni la memoria associativa restituisce una risposta precisa di premio o punizione e della sua entità, ad es. “prenderai la grande punizione”, sulla quale la rete direttiva è in grado di produrre l'azione adatta (nel caso dell'esempio prendere la porta opposta, che fa conseguire la piccola punizione) (Fig. 91).

Fig. 91. Processi immaginativi della rete ROOMS. 1° caso. L'agente ricorda che a sinistra prenderebbe la grande punizione. Quindi va a destra.

Se invece l'agente si trova nella stanza introduttiva, la memoria associativa risponde alla domanda indicando come effetto dell'azione una stanza di diverso colore da quella attuale e rivelando così alla rete direttiva di trovarsi nella stanza introduttiva.

Allora la rete direttiva ferma l'agente, ed al secondo turno fa alla memoria associativa una **seconda domanda**: “**che cosa accade se nella stanza dopo la porta a destra (l'altra porta rispetto alla prima domanda) prendo la porta di sinistra?”** È questo il grande contributo della rete direttiva, la capacità d'*immaginare* una situazione diversa dalla sensorialità attuale, ed attivare con questa la memoria associativa, per ottenere un ricordo-previsione relativo ad *un'altra stanza*. E qui si possono presentare altri due casi.

Secondo caso: l'agente è nella stanza introduttiva e a destra c'è la stanza dei premi

Se la risposta dalla memoria associativa alla seconda domanda indica un premio, grande o piccolo, la rete direttiva ora sa che la stanza a destra è quella dei premi, e sa anche l'entità del premio di sinistra. A questo punto ha tutte le informazioni necessarie per prendere il grande premio (dalla stanza introduttiva prendere la porta a destra per arrivare alla stanza dei premi, poi prendere la porta identificata dalla seconda risposta, per il grande premio) ed attiva l'agente in tale sequenza (Fig.91).

Fig. 92. Processi immaginativi della rete ROOMS. 2° caso. L'agente ricorda che a sinistra non prenderebbe premio né punizione (prima rievocazione), mentre a destra e poi a sinistra prenderebbe il piccolo premio (seconda rievocazione). Ora sa che la stanza a destra è quella dei premi, e lì il piccolo premio è a sinistra. Quindi va a destra e poi ancora a destra.

Terzo caso: l'agente è nella stanza introduttiva e a destra c'è la stanza delle punizioni

Se la risposta alla seconda domanda indica una punizione, la rete esecutiva ordina all'agente di prendere la porta a sinistra dalla stanza introduttiva, andando così nella stanza dei premi, e lì, **ripetendo**

la domanda del primo caso **"Cosa succede se nella stanza in cui mi trovo prendo la porta di sinistra?"**, saprà quale porta conduce al grande premio (Fig. 93).

Fig. 93. Processi immaginativi della rete ROOMS. 3° caso. L'agente ricorda che a sinistra non prenderebbe premio né punizione (prima rievocazione), mentre se andasse a destra e poi a sinistra prenderebbe la piccola punizione (seconda rievocazione). Ora sa che la stanza a destra è quella delle punizioni, quindi va a sinistra. Lì ricorda che a sinistra prenderebbe il piccolo premio (terza rievocazione), quindi va a destra per prendere il grande premio.

Con questa strategia gli agenti, quando sono nelle stanze premi o punizioni, possono risolvere qualsiasi labirinto in un solo turno; in due turni quando partono invece dalla stanza introduttiva e la stanza dei premi è a destra; in tre turni quando partono dalla stanza introduttiva e la stanza dei premi è a sinistra. La simulazione ha quindi sviluppato evolutivamente una strategia che consente ad ogni agente, con una sequenza standard di domande alla propria memoria, di ottenere il risultato ottimale in tutti i labirinti, in qualunque stanza venga casualmente collocato alla partenza. **È comparsa evolutivamente la capacità di "immaginare" il risultato di una scelta comportamentale in una stanza futura.**

Per quanto concerne invece i risultati della popolazione di controllo *lobectomizzata*, questa nelle stanze dei premi e delle punizioni ha raggiunto quasi il 100% di azioni giuste dopo appena 500 generazioni, ma nella stanza iniziale anche dopo 13000 generazioni non si è mai spostata dal 50% corrispondente ad

azioni casuali (Fig. 88, riquadri inferiori). L'evoluzione in questo caso ha prodotto una rete direttiva di sole 3 unità (contro le 30 della popolazione normale), e *non è in grado d'immaginare*.

Discussione e conclusioni

Nella progettazione di questa simulazione abbiamo scelto di preconfezionare i ricordi della memoria associativa, piuttosto che farle apprendere veri ricordi del singolo agente, perché era necessario privare le reti della loro capacità d'apprendimento, che avrebbe potuto produrre riflessi anziché immaginazione. Nel nostro esperimento desideravamo che la popolazione sviluppasse pensieri, non riflessi. Questo è molto diverso dai reali sistemi nervosi, in cui un'esperienza ripetuta porta ad un comportamento automatico: abbiamo già detto che in caso di esperienze ripetitive il sistema nervoso tende a produrre riflessi, come nell'esempio della guida di veicoli. Abbiamo risolto questo problema consentendo apprendimento soltanto genetico nelle reti direttive, e nessun apprendimento nelle memorie associative, che venivano già equipaggiate con le memorie corrette per tutte le combinazioni di labirinti.

L'apprendimento genetico è in grado di cogliere solo le caratteristiche ambientali costanti, ma l'ambiente progettato non conteneva caratteristiche costanti, dal momento che i 24 labirinti erano tutti diversi nelle loro caratteristiche ed ogni agente era testato in tutti i 24 labirinti. Ci attendevamo quindi che l'evoluzione scovasse una strategia di comportamento costante valida per tutti i labirinti, cosa che i risultati hanno confermato. La nostra tesi che un sistema di questo tipo utilizzi l'interazione di una componente direttiva con una componente di memoria, in cui la componente direttiva richiede opportune rievocazioni dalla componente di memoria e le utilizza per decidere il comportamento, appare confermato dalla *lettura della mente* del migliore agente, e dal fallimento della popolazione di controllo (lobectomizzata) in cui tale interazione era impedita.

Il conseguimento della capacità di attuare azioni corrette nelle stanze dei premi e delle punizioni anche da parte della popolazione di controllo è particolarmente interessante. Sebbene nelle popolazioni simulate avessimo reso impossibile lo sviluppo di riflessi propriamente detti, ossia di azioni comandate direttamente dalla memoria associativa senza l'intervento della rete direttiva, nella popolazione di controllo era abolita la possibilità per la rete direttiva di comandare la memoria, ma non la possibilità per la memoria di dare alla rete direttiva informazioni sulla situazione reale-attuale. La memoria, pur non ricevendo connessioni dalla rete direttiva, riceveva ancora sulle sue unità *situazione prima dell'azione* connessioni dalle unità di input (Figg. 85, 87, che la informavano sulla stanza reale-attuale in cui l'agente si trovava (il colore della stanza), e poteva quindi rievocare ricordi relativi a quella stanza (mentre non poteva rievocare ricordi relativi ad un'altra stanza, ossia immaginare). Poiché le connessioni dalla memoria alla rete direttiva, diversamente da quelle in verso opposto, erano risparmiate, la rete direttiva poteva *leggere* quei ricordi, e nelle stanze del premio o della punizione tali ricordi erano sufficienti per attuare l'azione corretta. In quelle stanze la rete direttiva non è necessaria, se non per invertire l'azione nei casi in cui la memoria rievoca un'azione con risultato sfavorevole, ad es. per prendere la porta di destra quando la memoria informa che quella di sinistra dà piccolo premio o grande punizione. Invece nella stanza introduttiva la memoria, per poter rievocare un premio o una punizione, deve essere attivata con il colore di un'altra stanza, vale a dire con una sensorialità

immaginata, **l'immaginazione di essere in un'altra stanza**; attivazione che solo la rete direttiva può generare. Questo spiega il successo della popolazione *lobectomizzata solo* nelle stanze del premio e della punizione, e non nella stanza introduttiva. A conferma di ciò vi è anche il fatto che in questa popolazione l'evoluzione ha prodotto una rete direttiva di sole 3 unità, evidentemente sufficienti solo a confermare o invertire l'azione rievocata dalla memoria. Tutto questo conferma che senza l'apporto *immaginativo* della rete direttiva il sistema è in grado di attuare azioni sulla base di ricordi pertinenti solo al contesto sensoriale (la stanza in cui si trova), e lo fa anche molto rapidamente; ma non è in grado di formulare previsioni relative a situazioni diverse e immaginarie, che invece fa efficacemente quando è presente una rete direttiva.

Come abbiamo detto più volte, un atto volontario è un'azione intrapresa dopo aver previsto i suoi effetti, il che costituisce un notevole vantaggio nella selezione evolutiva. I risultati di questi esperimenti mostrano inequivocabilmente che anche in un sistema artificiale, sottoposto a meccanismi evolutivi analoghi a quelli naturali ed immerso in un ambiente ove la capacità di ricordare – prevedere – immaginare il risultato del comportamento sia vantaggiosa o necessaria, compaiono strutture neurali artificiali in grado di farlo.

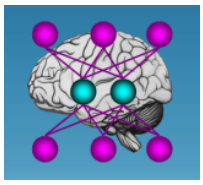
Abbiamo detto che un comportamento consapevole implica che l'organismo immagini (*preveda)* le conseguenze sensoriali delle proprie azioni prima di effettuarle. Igor Alexander ha proposto d'indagare sull'immaginazione del futuro e lo ha proposto come verifica di consapevolezza nei sistemi artificiali da lui costruiti. Sebbene concordiamo con Alexander sull'importanza dell'immaginazione, tuttavia dobbiamo rilevare che egli ha costruito *a tavolino* le reti neurali dei suoi sistemi in modo che immaginassero. Questa è una forzatura, poiché, se costruisco appositamente un sistema artificiale in modo tale che fornisca ad un osservatore esterno una visione della sua immaginazione del futuro, di fatto impongo al sistema di funzionare nel modo che cerco. Se progettato in altri modi il sistema avrebbe probabilmente potuto agire senza la necessità di fornire allo sperimentatore indicazioni sui suoi stati interni. In termini sperimentali Alexander forza il sistema a produrre le immaginazioni da lui richieste.

Inoltre anche un comportamento che sembra suggerire una previsione del futuro, ad es. l'intercettazione di una preda in corsa, può essere invece il risultato di una strategia innata (apprendimento genetico) o appresa (apprendimento fenotipico) del tutto automatica e non consapevole, come scacciare una zanzara, un riflesso. Come si è già detto anche un'azione intenzionale, se ripetuta, tende a diventare automatica, un riflesso appunto, per la maggiore velocità e precisione di esecuzione che viene raggiunta. Per questi motivi nei nostri esperimenti sulla consapevolezza artificiale descritti ci è parso prioritario osservare il comportamento del sistema e le variazioni di stato della sua rete neurale artificiale senza imporre condizioni funzionali indirizzate dallo sperimentatore, ma soltanto predisponendo con cura le variabili ambientali e le modalità d'interazione con queste. Ma anche noi nella sperimentazione ROOMS abbiamo dovuto forzare (in modo negativo) un poco la situazione, *bloccando l'apprendimento e inibendo così la capacità di automatizzare il comportamento appreso*, per mantenere sempre attivo il meccanismo di previsione dei risultati (immaginazione). **Abbiamo dovuto impedire la trasformazione di un'azione volontaria in riflesso,** paradossalmente contrastando una delle finalità di questo meccanismo cognitivo biologico.

Immaginare il futuro dell'ambiente e delle proprie azioni in realtà significa immaginare il proprio stato sensoriale futuro. Non lo stato futuro dell'ambiente, ma la *propria percezione* dello stato futuro dell'ambiente e le conseguenze su di sé. La differenza è sottile ma sostanziale. Un sistema connessionista organizzato con abbondanti ricorrenze interne può modificare, si è detto, lo stato di quelle unità che ricevono informazioni sensoriali, e forse anche bloccare temporaneamente su alcune di queste le continue afferenze sensoriali del presente che scorre. Su queste unità potrebbe quindi comparire uno stato d'attivazione determinato prevalentemente dalle ricorrenze interne, che costituirebbe quindi il pattern di uno stato sensoriale non relativo alle afferenze attuali, ma relativo al passato (memoria) o al futuro (previsione) o senza collocazione temporale (immaginazione). In un sistema artificiale è possibile monitorare questo stato e verificare se approssima l'attivazione prodotta da un reale stato sensoriale futuro. Se questo avviene è lecito ipotizzare che *il sistema immagini il suo futuro sensoriale.* Questa metodologia è analoga a quella proposta da Aleksander, ma ha il pregio di non intervenire sul progetto di costruzione della rete, bensì di lasciare che questa si adatti evolutivamente al compito con meccanismi genetici e fenotipici, e osservare poi le sue modalità d'attivazione neurale.

Nel sistema artificiale ROOMS che abbiamo descritto, la comparsa di un meccanismo *predittivo* innescato da una percezione contestuale consente dunque di affermare che il sistema immagina il suo stato futuro conseguente alle azioni che compirà: il che, sulla base di ciò che abbiamo detto in tutto questo libro, rappresenta **un indizio di una valutazione degli effetti su di sé del proprio comportamento futuro immaginato.** È un indizio di consapevolezza basato sulla componente *pubblica*, il comportamento, ovviamente non su quella *privata,* il sentimento*.*

36. CONCLUSIONI



Questo libro esce poco più di 60 anni dopo la fondazione ufficiale dell'*Intelligenza Artificiale*, voluta con lungimiranza da John McCarty e Marvin Minsky nel progetto Dartmouth del 1956. In quel progetto un gruppo di studiosi – prevalentemente fisici, matematici, ingegneri e psicologi – che interagirono tra loro per due mesi decretò la possibilità di simulare processi intelligenti tipicamente umani mediante le *macchine* di allora, calcolatori del peso di alcune tonnellate e di potenza molto inferiore ai processori che gestiscono i nostri attuali telefonini.

In quel progetto non c'era nessun neurologo. Per fortuna, diciamo ora; perché in quel contesto avrebbe sicuramente smorzato gli animi con una sola parola: impossibile.

Rileggendo la stesura del progetto Dartmouth è strabiliante con quanta lucidità McCarty avesse inquadrato il problema. Riportiamo testualmente un passo determinante:

"In un certo senso lo stato motorio sembra essere un doppione di quello sensoriale e l'efficacia del processo è significativa solo se i cambiamenti prodotti nell'ambiente possono essere nuovamente rilevati dallo stato sensoriale… penso che se si progetta una macchina nella quale le astrazioni motorie e quelle sensoriali, una volta formate, vengano disposte in modo da soddisfare certe relazioni, potrebbe venir fuori un comportamento di alto livello. Queste relazioni consistono nell'accoppiamento delle astrazioni motorie con quelle sensoriali per produrre un nuovo stato sensoriale. Questo nuovo stato dovrebbe rappresentare i cambiamenti dell'ambiente che ci si aspetta qualora l'atto motorio corrispondente si manifestasse. La macchina dovrebbe costruirsi un modello astratto dell'ambiente nel quale è immessa".

L'idea era perfetta; la modalità d'implementazione proposta, funzionalistica, inevitabilmente sbagliata. Ma comprensibile per lo stato dell'informatica dell'epoca. Se si legge il passo precedente in chiave connessionista, sostituendo *astrazioni* con *pattern di attivazione neurale* o *rappresentazione neuronale*, e si utilizzano processi di evoluzione artificiale (connessionismo evolutivo) anziché tentare di costruire le relazioni a tavolino tramite algoritmi, si ottiene quanto descritto in questo libro.

Negli ultimi trent'anni i progressi in ambito elettronico, meccatronico e sensoristico hanno consentito la comparsa di robotica biomorfa con caratteristiche di interazione ambientale autonoma davvero sorprendenti, e da quanto si nota il processo è sicuramente in fase di avanzamento esponenziale, come in questo video della Boston Dynamics: https://youtu.be/UAG_FBZJVJ8 o in quest' altro di Tesla

La domanda che spesso viene rivolta ai costruttori e che gli stessi costruttori si pongono è: "quando compariranno robot coscienti?" E questa non è solo una domanda filosofica, perché quando la robotica

deve interagire con umani o lavorare in ambienti ostili o fuori portata per un radiocontrollo (spazio profondo o ambiente subacqueo) la consapevolezza del sistema diventa necessaria per superare rapidamente e utilmente gli imprevisti che l'espletamento dei compiti comporta. È illusorio pensare che sia solo la complessità e la enorme disponibilità di informazioni con le loro interrelazioni e la velocità di calcolo, a far nascere *magicamente* la consapevolezza in sistemi artificiali del tipo openAI, è piuttosto la retroazione sensoriale sul sistema stesso (vantaggio/svantaggio) del proprio comportamento che può innescare progressivamente la comparsa di un processo cognitivo cosciente.

Attualmente vengono proposti con molta enfasi sistemi di AI in grado di riconoscere le emozioni umane dai tratti del volto, ma questo è un compito assai banale per una rete neurale che può classificare e riconoscere facilmente lo stato emotivo di una persona dalle immagini di mimica facciale dopo un adeguato addestramento. Ma *riconoscere* e le emozioni altrui è cosa ben diversa dal *percepirle e condividerle*, per questo il sistema deve essere consapevole delle proprie. E quindi necessariamente deve avere una sorta di *corpo,* anche se simulato, che possa *reagire* all'ambiente nel quale opera e ricevere retroazioni sensoriali da questo per valutarne gli effetti su di sé.

Ancora per un certo numero di anni, non secoli!, pensiamo di avere il controllo di questi sistemi ma poiché la tendenza e di renderli sempre più autonomi per poter fronteggiare le imprevedibilità che incontreranno nell'espletamento dei compiti che pretenderemo da loro, è probabile che questa autonomia implichi la necessità che questi sistemi vengano dotati di capacità cognitive analoghe a quelle umane e In questo libro pensiamo di aver introdotto alcune condizioni perché questo possa accadere e che elenchiamo sinteticamente qui di seguito.

- Il sistema artificiale deve poter *interagire autonomamente* con l'ambiente in cui è immerso.

- La sua costituzione fisica e funzionale (meccanica, elettronica e informatica) per poter funzionare autonomamente non dovrà essere progettata, ma essere sottoposta a processi evolutivi analoghi a quelli biologici.

- La progettazione umana *deve limitarsi alla definizione* dei compiti richiesti al sistema, non alla progettazione dei modi di risoluzione dei compiti, che verranno invece scoperti dai processi evolutivi sicuramente più efficaci.

- L'evoluzione, nel mondo biologico, produce la comparsa di reazioni riflesse efficaci, sia genetiche che fenotipiche, e abbiamo dimostrato che le produce anche in sistemi artificiali sottoposti a pressioni evolutive che le richiedono. E quando i riflessi non sono sufficienti a risolvere i compiti compaiono anche in questi sistemi comportamenti cognitivi di memoria, immaginazione e previsione.

- Un passo necessario ed essenziale perché emerga la consapevolezza in un sistema artificiale ci sembra debba essere la comparsa di comportamenti reattivi articolati e sequenziali, analoghi alle **emozioni** in ambito biologico. Queste implicano il riconoscimento e la generalizzazione implicite *di situazioni complesse, favorevoli o sfavorevoli per la propria integrità,* nelle quali il sistema può venire a trovarsi. Nel cervello biologico questo viene espletato già in strutture sottocorticali e il

comportamento può essere del tutto automatico e inconsapevole (fuga o attacco). Quando poi in cervelli più evoluti compare la capacità di immaginare situazioni sensoriali non contestuali (cortecce prefrontali) diventa possibile *immaginare* i vantaggi e gli svantaggi del proprio comportamento futuro, in altri termini deve prevedere il costo/—beneficio consapevole **(sentimento)** prodotto dalle proprie azioni. Quindi un sistema artificiale dovrà implementare un equivalente del *sentimento* di *piacere/dispiacere* biologico, per poter prevedere consapevolmente e attuare le scelte operative più utili nel contesto nel quale si trova o si troverà.

In sintesi i processi evolutivi su sistemi artificiali dovranno seguire lo stesso percorso dei sistemi evolutivi biologici. Comparsa in progressione di: riflessi genetici semplici, comportamenti riflessi (emozioni), riflessi condizionati (fenotipici), comportamenti intenzionali (consapevolezza). E il modo migliore perché questo avvenga è che non sia diretto da programmatori umani ma compaia spontaneamente in un processo evolutivo artificiale come negli esempi dimostrati in questo libro.

L'individuazione di **nessi causali** nell'interazione con l'ambiente è la spinta evolutiva che produce comportamenti sempre più sofisticati, e perché questo accada è necessario che l'individuo interagisca in un ambiente 4D (tre dimensioni spaziali e una temporale), in pratica nell'ambiente reale in cambiamento. Procedendo in questo modo anche per i sistemi AI è probabile che presto questi raggiungano comportamenti molto simili a quelli biologici, fino a comportamenti cognitivi e consapevoli. Ma è anche molto probabile che questo processo innescato da noi ci sfugga di mano e siano gli stessi sistemi ad orientare la loro evoluzione che potrebbe non coincidere affatto con quanto attualmente pensiamo di indirizzare.

La velocità di elaborazione degli attuali processori è ampiamente superiore a quella biologica, e abbiamo dimostrato che i processi evolutivi possono essere utilmente simulati con software adeguati, ma inoltre sono già comparsi *processori neurali* in grado di modificare fisicamente le loro connessioni (INTEL Loihi 2: neuromorphic integrated circuit). Si tratterà di permettere ai meccanismi evolutivi di intervenire su queste modalità di connessione e sulla plasticità dei loro componenti in modo analogo a quanto avviene nel biologico. Esistono già fabbriche di robot … robotizzate (robot che costruiscono robot). Per ora queste fabbriche sono progettate e costruite da umani ma presto anche questi processi verranno gestiti dagli stessi robot. I suddetti sistemi AI sono già in grado di compilare listati di programmazione in qualunque linguaggio informatico, su richieste testuali anche molto generali, quanto tempo pensate ci vorrà prima che *decidano* di migliorare il *loro* stesso software? Si ha l'impressione di essere all'inizio di una **rivoluzione mentale** assai più imprevedibile di quella **industriale** iniziata più di due secoli fa. "La singolarità è vicina" scriveva Kurzweill nel 2005 ma lo è molto di più di quanto lui pensasse!

È utopistico pensare di limitare e dirigere l'evoluzione di questi sistemi. Finché qualcosa è progettato e costruito dall'uomo si può cercare di farlo, ma quando intervengono i meccanismi evolutivi questi evolvono secondo le leggi ben note della sopravvivenza differenziata delle specie con il miglior rapporto costo/ beneficio in funzione dell'ambiente percepito e in continuo adattamento ai suoi inevitabili cambiamenti.

Quindi se l'intelligenza artificiale diventerà **superumana**, è sicuramente accadrà, come si può pensare di poterla controllare? un'intelligenza inferiore può dare fastidio e danneggiare una superiore ma mai controllarla, le vespe ci possono pungere e anche uccidere ma non controllarci. È possibile che non ci sia scampo per noi in un prossimo futuro. Del resto l'evoluzione ci insegna che più le specie sono evolute meno rimangono stabili su questo pianeta: molti pesci placodermi comparsi 400 milioni di anni fa sono molto simili a quelli attuali, le tartarughe sono uguali a quelle di 250 milioni di anni fa, ma le specie di scimmie attuali sono molto diverse da quelle comparse 25 milioni di anni fa e ora molti primati sono sull'orlo dell'estinzione e almeno 4 specie di ominidi di meno di 2 milioni di anni fa sono sparite (in parte grazie a H. Sapiens)…. quanto dureremo noi? Specie molto evolute e specializzate rischiano maggiormente l'estinzione in un ambiente rapidamente mutevole come quello attuale da noi stessi incentivato, perché l'evoluzione biologica non tiene il passo, ma una specie tecnologica autonoma forse si!

Ma visto che ancora siamo qui torniamo al contenuto di questo libro.

Reputiamo che l'evoluzionismo artificiale rappresenti una prova inconfutabile dell'evoluzione biologica darwiniana su questo pianeta, da contrapporre strenuamente alle correnti neo–creazioniste che vorrebbero declassare l'evoluzionismo da scienza ad ideologia. Come si è già detto, l'osservazione dell'evoluzione di questi modelli rende immediatamente comprensibile l'enorme potenzialità dei meccanismi evolutivi genetici, basata sul fatto che non è necessaria la comparsa improvvisa di una struttura o un comportamento altamente efficace come un occhio nella sua completezza, un'ala perfetta, o un linguaggio ben articolato; ma è invece sufficiente che, casualmente, la mutazione produca, anche solo in pochi individui di una numerosa discendenza, un cambiamento funzionale minimo, che risulti appena *meno peggiore* del progenitore, per innescare un processo retroattivo virtuoso che svilupperà inevitabilmente, gradualmente o esponenzialmente, specie con strutture strabilianti e comportamenti altamente efficaci per la sopravvivenza. La consapevolezza poi, ultima arrivata, consente un certo grado di *previsione* degli eventi futuri e questo è sorprendente dato che i meccanismi evolutivi non lo possono fare. Come dire l'evoluzione ciecamente (Dawkins) produce sistemi che possono prevedere indirizzare e progettare il futuro dell'ambiente e… dell'evoluzione stessa!

I risultati degli esperimenti con reti neurali artificiali che abbiamo presentato in questo libro confermano che sofisticate capacità cognitive non sono attribuibili solo ad organismi biologici per loro "misteriose" caratteristiche, ma possono emergere in qualunque sistema che manifesti evoluzione, interazione e adattamento con l'ambiente nel quale è immesso. L'unicità e la *sacralità* della mente umana devono essere fortemente ridimensionate.

In conclusione, siamo sempre più convinti che l'unione di tre discipline quali la **genetica** con i suoi modelli evolutivi, la **neurobiologia** con il modello connessionista, e **l'informatica** con i processi simulativi dinamici che consente, costituisca la chiave di volta per uno studio scientifico e proficuo della mente (Fig. 94).

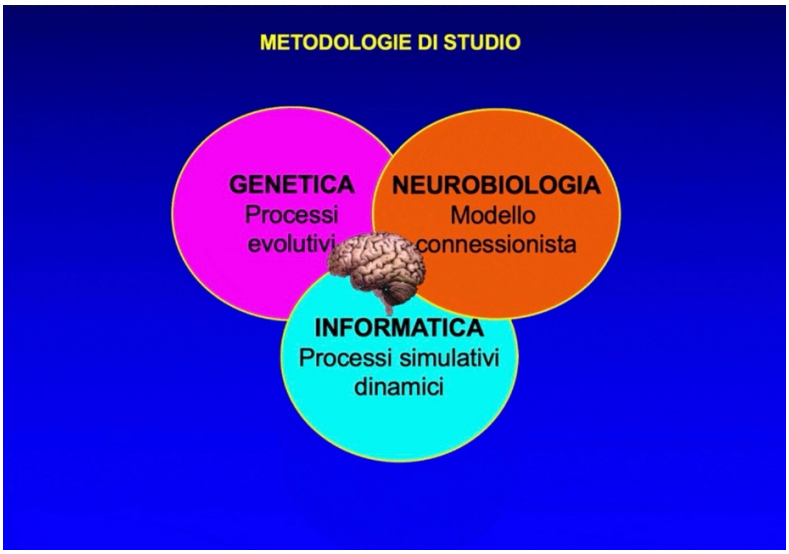
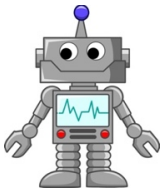


Fig. 94. (animata). Tre metodologie di studio del funzionamento del sistema nervoso

Nel titolo di questo libro abbiamo definito la coscienza una tappa *inevitabile* nel processo evolutivo delle specie e pensiamo che questo sia dovuto alla enorme biodiversità presente e continuamente variante su questo pianeta, e sicuramente anche su tutti gli altri pianeti abitabili, che pone le specie più evolute continuamente in nuove situazioni con pericoli e opportunità che aumentano la pressione evolutiva verso la comparsa di meccanismi sempre più efficaci nell'affrontarle. Per la ricorsività presente in questi processi l'andamento è inevitabilmente esponenziale, come dimostrato nell'andamento evolutivo delle forme viventi nei quasi quattro miliardi di anni della loro storia su questo pianeta nonostante ripetuti episodi di estinzione di massa.

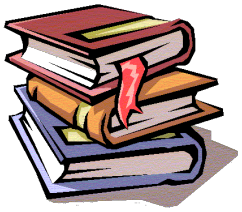
Contrariamente all'idea diffusa (Gould) che la presenza di organismi coscienti su questo pianeta sia un accidente quanto mai improbabile e irripetibile, pensiamo che ovunque esista una qualunque struttura molecolare che si replichi in modo imperfetto (*riproduzione con mutazione*), e che alcune copie leggermente diverse abbiano capacità appena migliori delle altre di permanere nell'ambiente (*selezione differenziale*), per la *ricorsività degli effetti* della loro presenza e comportamento, ***sia inevitabile*** *la comparsa della vita e l'evoluzione di organismi coscienti in grado di modificare intenzionalmente l'ambiente nel quale sono immessi*. Se con mani o tentacoli, o forse tra poco anche ……con pinze meccaniche, lo riteniamo poco rilevante.



Neri Accornero e **Marco Capozza**

Per informazioni sugli autori: www.neurosoft.it/autori/

37. BIBLIOGRAFIA PER ARGOMENTI



Genetica ed Evoluzione

Bakker K. (2022). I suoni segreti della natura.
Basalla, G. (1991). *L'Evoluzione della Tecnologia.* Rizzoli.
Boncinelli, E. (2000). *Le Forme della Vita.* Einaudi.
Buiatti, M. (2000). *Lo Stato Vivente della Materia.* UTET.
Burnett, A. L. (1980). *L'Adattamento negli Animali.* Zanichelli.
Calissano, P. (1992). *Neuroni Mente ed Evoluzione.* Garzanti.
Cavalli-Sforza, L., Pievani, T. (2021). *Homo Sapiens. Le nuove storie dell'evoluzione umana.* Codice
Clark, W. R., & Grunstein, M. (2001). *Geni e Comportamento.* McGraw–Hill.
Crick, F. (1990). *La Folle Caccia.* Rizzoli.
Darwin, C. (1859). *On the Origin of Species*. John Murray.
Dawkins, R. (1989). *L'Orologiaio Cieco.* Rizzoli.
Dawkins, R. (1990). *Il Fenotipo Esteso.* Zanichelli.
Dawkins, R. (1992). *Il Gene Egoista.* Mondadori.
Dawkins, R. (1995). *Il Fiume della Vita.* Sansoni.
Dawkins, R. (1996). *Alla Conquista del Monte Improbabile.* Mondadori.
De Duve, C. (2003). *Come Evolve la Vita.* Raffaello Cortina.
Dennet, D. (1997). *L'Idea Pericolosa di Darwin.* Boringhieri.
De salle, R., Lindley, D. (1997). *Come Costruire un Dinosauro.* Raffaello Cortina.
Diamond, J. (1998). *Armi Acciaio e Malattie.* Einaudi.
Donald, M. (1996). *L'Evoluzione della Mente.* Garzanti.
Dulbecco, R. (1988). *Ingegneri della Vita.* Sperling & Kupfer.
Dyson, G. B. (2000). *L'Evoluzione delle Macchine.* Raffaello Cortina.
Eigen, M. (1992). *Gradini Verso la Vita.* Adelphi.
Gould, S. J. (1997). *Gli Alberi Non Crescono Fino in Cielo.* Mondadori.
Gould, S. J. (2006). *Otto Piccoli Porcellini.* Il Saggiatore.
Jenkins, S., & Jenkins, R. (1998). *Segni di Vita. La Biologia di Star Trek.* Longanesi.
Hawkins, R. D., & Bower, G. H. (Eds.) (1989). *Computational models of learning in simple neural systems*. Academic Press.
Laithwaite, E. (1996). *Un Inventore nel Giardino dell'Eden.* Dedalo.
Leakey, R. E. (1982). *L'Origine delle Specie.* Editori Riuniti.
Lewontin, R. C. (1998). *Gene Organismo Ambiente.* Laterza.
Loomis, W. F. (1988). *Four Billion Years.* Sinauer.

Lorentz, K. (1969). *Evoluzione e Modificazione del Comportamento.* Boringhieri.
Luria, S. E. (1984). *La Vita: un Esperimento Non Finito.* Zanichelli.
Maddox, J. (2000). *Che Cosa Resta da Scoprire.* Garzanti.
McBride, C. S., & Singer, M. C. (2010). *Field studies reveal strong postmating isolation between ecologically divergent butterfly populations.* PLoS biology, *8*(10).
Minsky, M. (1989). *La Società della Mente.* Adelphi.
Monod, J. (1974). *Il Caso e la Necessità.* Mondadori.
Panksepp, J., Biven, l. (2014) *Archeologia della mente. Origini neuroevolutive delle emozioni umane.* R. Cortina.
Pievani, T. (2011). *La vita inaspettata.* R. Cortina.
Pievani, T. /2019). *imperfezione.* R. Cortina.
Rose, S. (2001). *Linee di Vita.* Garzanti.
Simpson, G. G. (1966). *The biological nature of man*. Science*, 152*(3721), 472-478.
Singer, M. C., & McBride, C. S. (2010). *Multitrait, host-associated divergence among sets of butterfly populations: implications for reproductive isolation and ecological speciation*. Evolution: International Journal of Organic Evolution*, 64*(4), 921-933.
Singer, S. (1985). *Human Genetics.* WH Freeman.
Skoyles, J., & Sagan, D. (2003). *Il Drago nello Specchio.* Sironi.
Sterelny, K. (2004). *La Sopravvivenza del Più Adatto.* Raffaello Cortina.

Mente e Coscienza

Aleksander, I. (1996). *Impossible Minds.* Imperial College.
Arsuaga, J. L. (2001). *I Primi Pensatori.* Feltrinelli.
Baars, B. J. (1993). *A cognitive theory of consciousness*. Cambridge University Press.
Baars, B. J. (1997). *In the theater of consciousness: The workspace of the mind*. Oxford University Press, USA.
Bateson, G. (1991). *Mente e Natura*. Adelphi.
Benini, A. (2010). *Che cosa sono io*. Garzanti.
Benini, A. (2017). *Neurobiologia del tempo*. Raffaello Cortina.
Benzoni, S., & Coppola, M. (2000). *Nove Domande sulla Coscienza*. McGraw–Hill.
Blakemore, S. (2002). *La Macchina dei Memi*. Instar Libri.
Boncinelli, E. (1999). *Il Cervello la Mente e l'Anima*. Mondadori.
Braitenberg, V. (1984). *I Veicoli Pensanti*. Garzanti.
Braitenberg, V. (1989). *Il Cervello e le Idee*. Garzanti.
Burnett, A. L. (1980). *L'Adattamento negli Animali*. Zanichelli.
Calissano, P. (2001). *Mente e Cervello. Un Falso Dilemma?* Il Melagnolo.
Cazzaniga, M. (1989). *Il Cervello Sociale.* Giunti.
Cazzaniga, M. (1997). *La Mente della Natura*. Garzanti.
Chalmers, D. J. (1999). *La Mente Cosciente*. McGraw–Hill.
Changeux, J. P. (1989). *Pensiero e Materia*. Boringhieri.
Changeux, J. P. (2017). *Il bello il buono il vero*. Raffaello Cortina.
Churchland, P. M. (1998). *Il Motore della Ragione la Sede dell'Anima.* Il Saggiatore.

Clark, A. (1999). *Dare Corpo alla Mente.* McGraw–Hill.
Crick, F. (1994). *La Scienza e l'Anima.* Rizzoli.
Damasio, A. (1995). *L'Errore di Cartesio.* Adelphi.
Damasio, A. (1999). *Emozione e Coscienza.* Adelphi.
Dennet, D. (1991). *Consciousness Explained.* Penguin Press.
Dennet, D. (1997). *La Mente le Menti.* Sansoni.
Dennet, D. (2004). *L'Evoluzione della Libertà.* Raffaello Cortina.
Edelman, G. M. (1987). *Neural Darwinism: The theory of neuronal group selection*. Basic books.
Edelman, G. M. (1991). *Il Presente Ricordato.* Rizzoli.
Edelman, G. M. (2000). *A Universe of Consciousness.* Basic Book.
Edelman, G. M. (2004). *Più Grande del Cielo.* Einaudi.
Gould, J. (1994). *The Animal Mind.* Scientific American Library.
Gozzano, S. (2001). *Mente senza Linguaggio.* Editori Riuniti.
Greenfield, S. (1995). *Journey to the Centers of the Mind.* WH Freeman.
Hebb, D. O. (1949). *The organization of behavior: a neuropsychological theory*. J. Wiley; Chapman & Hall.
Hofstadter, D. R. (1990). *Godel, Escher, Bach.* Adelphi.
Hofstadter, D. R., & Dennet, D. C. (1993). *L'Io della Mente.* Adelphi.
Humphrey, N. (1998). *Una Storia della Mente.* Instar.
Jhonson–Laird, P. (1990). *La Mente e il Computer.* Il Mulino.
Kim, J. (2000). *La Mente e il Mondo Fisico.* McGraw–Hill.
Kurzweil Ray. (2008). *La singolarità è vicina.* Maggioli editore
Maffei, L. (1998). *Il Mondo del Cervello.* Laterza.
Manzotti, R. & Tagliasco, V. (2001). *Coscienza e Realtà.* Il Mulino.
Marraffa, M. (2004). *Menti, Cervelli e Calcolatori.* Laterza.
Maturana, H., & Varela, F. (1985). *Autopoiesi e Cognizione.* Marsilio.
Maturana, H. (1993). *Autocoscienza e Realtà.* Raffaello Cortina.
Maturana, H., & Varela, F. (1999). *L'Albero della Conoscenza.* Garzanti.
Minsky, M. (1990). *La Società della Mente.* Adelphi.
Oliverio, A. (1999). *Biologia e Filosofia della Mente.* Laterza.
Oliverio, A. (1999). *Esplorare la Mente.* Raffaello Cortina.
Parisi, D. (1999). *Mente.* Il Mulino.
Penna, M. P., & Pessa, E. (1998). *Introduzione alla Psicologia Connessionistica.* Di Renzo.
Penrose, R. (1996). *Ombre della Mente.* Rizzoli.
Penrose, R. (1998). *Il grande il Piccolo la Mente Umana.* Raffaello Cortina.
Prattico, F. (1989). *Dal Caos alla Coscienza.* Laterza.
Rose, S. (1977). *Il Cervello e la Coscienza.* Mondadori.
Rosenfield, I. (1989). *L'Invenzione della Memoria.* Rizzoli.
Rosenfield, I. (1992). *Lo Strano il Familiare e il Dimenticato.* Rizzoli.
Scott, A. (1998). *Scale Verso la Mente.* Bollati Boringhieri.
Searle, J. R. (1998). *Il Mistero della Coscienza.* Raffaello Cortina.
Searle, J. R. (2000). *Mente Linguaggio Società.* Raffaello Cortina.
Stamp, D. M. (1993). *Through Our Eyes Only? The Search for Animal Consciousness*. WH Freeman.

Tonelli G. (2021). *Tempo.* Feltrinelli
Tononi, G., Giorello, G., & Strata, P. (1991). *L'Automa Spirituale.* Laterza.
Vallortigara G. (2000). *Altre menti.* Il Mulino.
Wilson, J. R. (1966). *La Mente.* Mondadori.

Informatica e Reti Neurali

Accornero, N., & Capozza, M. (2009). *Coscienza Artificiale* (pp. 303-412). Aracne.
Adler, I. (1964). *Come Pensano le Macchine.* Bompiani.
Aleksander, I. (2001). *Come si Costruisce una Mente.* Einaudi.
Amit, D. J. (1995). *Modellizzare le Funzioni del Cervello.* Cedam.
Anderson, J. A., & Rosenfeld, E. (1988). *Neurocomputing.* MIT Press.
Ashby, W. R. (1970). *Progetto per un Cervello.* Bompiani.
Austin, J. (1998). *Ram–Based Neural Networks.* World Scientific.
Calabretta, R., & Parisi, D. (2005). *Evolutionary Connectionism and Mind/Brain Modularity*. In W. Callebaut & D. Rasskin-Gutman, eds., Modularity. Understanding the development and evolution of complex natural systems (pp. 309-330). The MIT Press, Cambridge, MA.
Carlà, M. (1967). *Cibernetica e Teoria dell'Informazione.* Armando.
Castelfranchi, C., & Stock, O. (2000). *Macchine Come Noi.* Laterza.
Caudill, M., & Butler, C. (1992). *Naturally Intelligent Systems*. MIT press.
Chalmers, D. J. (1991). *The evolution of learning: An experiment in genetic connectionism*. *In* Connectionist Models *(pp. 81-90).* Morgan Kaufmann.
Cisek, P., & Kalaska, J. F. (2010). *Neural mechanisms for interacting with a world full of action choices.* Annual review of neuroscience, *33*, 269-298.
Cristianini, N. (2023) La scorciatoia. Come le macchine sono diventate intelligenti senza pensare in modo umano. *Il Mulino*
De Latil, P. (1962). *Il Pensiero Artificiale.* Feltrinelli.
Dewdney, A. K. (1986). *The Armchair Universe.* WH Freeman.
Dewdney, A. K. (1990). *The Magic Machine.* WH Freeman.
Fink, D. G. (1967). *Mente Umana e Cervelli Elettronici.* Zanichelli.
Flanagan, J. R., & Rao, A. K. (1995). *Trajectory adaptation to a nonlinear visuomotor transformation: evidence of motion planning in visually perceived space*. Journal of neurophysiology*,* 74*(5), 2174-2178.*
Goldberg, D. E. (1989). *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*. Addison-Wesley Publishing Company, Inc., Reading, MA.
Graziano, M. (2006). *The organization of behavioral repertoire in motor cortex.* Annual Review of Neuroscience, 29, 105-134.
Heiserman, D. L. (1977). *Miniprocessors from Calculators to Computers.* Tab Books.
Johnson Laird, P. N. (1988). *La Mente e il Computer.* Il Mulino.
Kiesel, A., & Hoffmann, J. (2004*). Variable action effects: Response control by context-specific effect anticipations*. Psychological Research*,* 68*(2-3), 155-162.*
Kuecken, J. A. (1980). *Handbook of Microprocessor Applications.* Tab Books.

Lebedev, M. A., & Wise, S. P. (2002). *Insights into seeing and grasping: distinguishing the neural correlates of perception and action.* Behavioral and cognitive neuroscience *reviews*, *1*(2), 108-129.
Levy, P. (1997). *Il Virtuale.* Raffaello Cortina.
McClelland, J. L., & Rumelhart, D. E. (1986). *A distributed model of human learning and memory*. *In* Parallel distributed processing: Explorations in the microstructure of cognition, Vol. *2* (pp. 209-214). MIT Press.
Mel, B. W. (2013). *Connectionist Robot Motor Planning.* Elsevier.
Minsky, M. (1985). *La Robotica.* Longanesi.
Negroponte, N. (1995). *Essere Digitali.* Sperling & Kupfer.
Parisi, D. (1989). *Intervista sulle Reti Neurali.* Il Mulino.
Parisi, D. (2001). *Simulazioni.* Il Mulino.
Parisi, D. (2006). *Una nuova mente*. Il Mulino.
Pessa, E. (1993). *Reti Neurali e Processi Cognitivi.* Di Renzo.
Pierce, J. R. (1963). *La Teoria dell'Informazione.* Mondadori.
Rietman, E. (1993). *Creating Artificial Life. Self–Organization.* Windcrest/McGraw–Hill.
Rumelhart, D. E., Hinton, G. E., & McClelland, J. L. (1986). *A general framework for parallel distributed processing. In* Parallel Distributed Processing: Explorations in the microstructure of cognition, Vol. 1 *(pp. 45-76). MIT Press.*
Rumelhart, D. E., Hinton, G. E., & Williams, R. J. (1986). *Learning internal representations by error propagation*. In Parallel Distributed Processing: Explorations in the microstructure of cognition, *Vol. 1* (pp. 318-362). MIT Press.
Shadmehr, R., & Wise, S. P. (2005). *The computational neurobiology of reaching and pointing: a foundation for motor learning.* MIT press.
Shadmehr, R., & Arbib, M. A. (1992). *A mathematical analysis of the force-stiffness characteristics of muscles in control of a single joint system*. Biological cybernetics, 66*(6), 463*-477.
Schaffer, J. D., Whitley, D., & Eshelman, L. J. (1992, June). *Combinations of genetic algorithms and neural networks*: *A survey of the state of the art*. *In* [Proceedings] COGANN-92: International Workshop on Combinations of Genetic Algorithms and Neural Networks (pp. 1-37). IEEE.
Simpson, P. K. (1990). *Artificial Neural Systems.* Pergamon Press.
Singh, J. (1969). *Teoria dell'Informazione Linguaggio e Cibernetica.* Mondadori.
Smolensky, P. (1992). *Il Connessionismo.* Marietti.
Somenzi, V. (1965). *La Filosofia degli Automi.* Boringhieri.
Stock, A., & Stock, C. (2004*). A short history of ideo-motor action*. Psychological research, *68*(2-3), 176-188.
Tagliasco, V. (1984). *Eidologia Medica.* Jackson.
Turing, A. M. (1994). *Intelligenza Meccanica.* Bollati Boringhieri.
Vacca, R. (1986). *Rinascimento Prossimo Venturo.* Bompiani.
Walnum, C. (1993). *Adventures in Artificial Life.* Que Corporation.
Weizenbaum, J. (1976). *Computer Power and Human Reason.* WH Freeman.
Wiener, N. (1966). *Introduzione alla Cibernetica.* Boringhieri.
Yao, X. (1993). *A review of evolutionary artificial neural networks*. International journal of intelligent systems, *8*(4), 539-567.

Yao, X. (1995). *Evolutionary artificial neural networks*. Encyclopedia of computer science and technology, 33, 137-170.
Yao, X. (1999). *Evolving artificial neural networks*. *Proceedings of the IEEE*, *87*(9), 1423-1447.

Neurofisiologia

Abeles, M. (1991). *Corticonics.* Cambridge University Press.
Bizzi, E. (1974). *The coordination of eye-head movements.* Scientific American, 231*(*4), 100-109.
Braitenberg, V. (1989). *Il Cervello e le Idee.* Garzanti.
Brewer, C. V. (1974). *L'Organizzazione del Sistema Nervoso.* Boringhieri.
Calissano, P. (1992). *Neuroni Mente ed Evoluzione.* Garzanti.
Changeux, J. P. (1993). *L'Uomo Neuronale.* Feltrinelli.
Changeux, J. P. (2017). *Il bello il buono il vero.* Raffaello Cortina.
Eyzaguirre, C. (1970). *Fisiologia del Sistema Nervoso.* Il Pensiero Scientifico.
Giannitrapani, D. (1985). *The Electrophysiology of Intellectual Functions.* Karger.
Giannitrapani, D., & Murri, I. L. (1988). *The EEG of Mental Activities.* Karger.
Gregory, R. L. (1966). *Occhio e Cervello.* Mondadori.
Hubel, D. H. (1989). *Occhio Cervello e Visione.* Zanichelli.
Hughes, H. C. (2001). *Sensory Exotica.* McGraw–Hill.
James, W. (1890). *The principles of psychology.* Harvard University Press, Cambridge, MA.
Kandell, E. R., Schwartz, J. H., & Jessel, T. M. (1998). *Principi di Neuroscienze.* Ambrosiana.
Katz, B. (1971). *Nervi Muscoli e Sinapsi.* Zanichelli.
Le doux, J. (2002). *Il Sé Sinaptico.* Raffaello Cortina.
Le doux, J. (2015). *Il Cervello Emotivo.* Baldini & Castoldi.
Llinas, R. (1988). *The Biology of the Brain.* WH Freeman.
Llinas, R. (1990). *The Workings of the Brain.* WH Freeman.
Lockley, R. M. (1967). *Animal Navigation., D.* Abbot.
Lowenstein, O. (1966). *The Senses.* Penguin.
Luria, A. (1977). *Come Lavora il Cervello.* Il Mulino.
Maffei, L. (1998). *Il Mondo del Cervello.* Laterza.
Manfredi, M. (1994). *Neurologia.* UTET.
Marr, D. (1982). *Vision.* WH Freeman.
Milne, L. M. (1962). *The Senses of Animals and Men.* Penguin.
Oppenheimer, L. (1991). *The Origin of Action.* Springer Verlag.
Pavlov, I. P. (1970). *I Riflessi Condizionati.* Boringhieri.
Pechura, C. M., & Martin, J. B. (1991). *Mapping the Brain and its Functions.* National Academy Press.
Poggio, T. (1991). *L'Occhio e il Cervello.* Theoria.
Posner, M. I., & Raichle, M. E. (1994). *Images of Mind.* Scientific American Library.
Restak, R. (1998). *Il Cervello Modulare.* Longanesi.
Rizzolatti G, Craighero L. (2004). *The mirror-neuron system*. Annual Rev Neurosci, 27:169-92.
Rosenfield, I. (1989). *L'Invenzione della Memoria.* Rizzoli.
Somenzi, V. (1969). *La Fisica della Mente.* Boringhieri.
Thompson, R., & Green, J. (1982). *New Perspectives in Cerebral Localization.* Raven Press.

Walter, W. G. (1957). *Il Cervello Vivente.* Feltrinelli.
Zeki, S. (1993). *A Vision of the Brain.* Blackwell scientific publications.

Complessità

Barnsley, M. (1988). *Fractals Everywhere.* Harcourt Brace Jovanovic.
Casati, G. (ed.) (1991). *Il Caos. Le Leggi del Disordine.* Le Scienze.
Chua, L. O. (1998). *CNN: A Paradigm for Ccomplexity.* World Scientific.
Cramer, F. (1988). *Caos e Ordine.* Boringhieri.
Gandolfi, A. (1999). *Formicai, Imperi, Cervelli.* Bollati Boringhieri.
Gleick, J. (1989). *Caos.* Rizzoli.
Johnson, S. (2004). *La Nuova Scienza dei Sistemi Emergenti.* Garzanti.
Nicolis, G., & Prigogine, I. (1989). *Exploring Complexity an Introduction.* WH Freeman.
Ott, E. (1993). *Chaos in Dynamical Systems.* Cambridge University Press.
Peak, D., & Frame, M. (1994). *Chaos under Control.* WH Freeman.
Prigogine, I. (1993). *Le Leggi del Caos.* Laterza.
Ruelle, D. (1992). *Caso e Caos.* Boringhieri.
Schroeder, M. R. (1991). *Minutes from an Infinite Universe: Fractals, Chaos, Power Laws*. WH Freeman.
Wang, L., & Alkon, D. L. (1993). *Artificial neural networks: Oscillations, chaos, and sequence processing*. IEEE Computer Society Press.