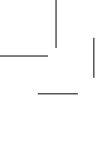




MIMESIS PICCOLA BIBLIOTECA







**FRANCO
FABBRO**

FILOSOFIA
DELLA
INFORMAZIONE
BIOLOGICA

DNA, SISTEMA NERVOSO,
PSICHE E LINGUAGGIO



MIMESIS



MIMESIS EDIZIONI (Milano – Udine)
www.mimesisedizioni.it
mimesis@mimesisedizioni.it

Collana: *Piccola Biblioteca*, n. xxx
Isbn: ???

© 2026 – MIM EDIZIONI SRL
Piazza Don Enrico Mapelli, 75
20099 Sesto San Giovanni (MI)
Phone: +39 02 24861657 / 21100089

INDICE

x	Prefazione <i>di Luca Taddio</i>
x	1. Introduzione
x	2. Biologia e vita
x	3. L'origine del concetto di informazione
x	4. Matematica della comunicazione e intelligenza artificiale
x	5. Che cos'è l'informazione?
x	6. L'informazione a livello del DNA
x	7. L'informazione a livello del sistema nervoso
x	8. L'informazione a livello della psiche
x	9. Linguaggio e informazione
x	10. Conclusioni

x	Postfazione <i>di Elio Toppino</i>
x	Ringraziamenti
x	Bibliografia
x	Indice analitico

PREFAZIONE

Ci sono parole che attraversano il nostro tempo come correnti sotterranee: le avvertiamo ogni giorno, le pronunciamo quasi distrattamente, le incontriamo nelle conversazioni quotidiane, nei notiziari che ci aggiornano, nei laboratori scientifici dove si analizzano dati e fenomeni, negli algoritmi che modellano il nostro presente, e tuttavia continuiamo a non sapere definirle davvero. “Informazione” è una di queste parole che, quanto più viene utilizzata, tanto più sembra sfuggirci, come se custodisse un nucleo segreto che si sottrae a ogni tentativo di cattura concettuale, illuminando e confondendo allo stesso tempo, come quei concetti che ci precedono e ci eccedono.

Per comprendere questo nucleo è necessario uscire dagli slogan che dominano l'immaginario digitale e tornare al luogo in cui l'informazione nasce davvero: la vita. È precisamente ciò che fa Franco Fabbro, il quale, da neuroscienziato, psicologo e studioso del linguaggio, ha attraversato territori diversi, dal cervello ai simboli, dalla biologia

cellulare alla psiche, e oggi, in questo libro, accompagna il lettore nel punto di intersezione in cui le discipline cessano di essere compartimenti stagni per convergere verso un'unica domanda: che cos'è l'informazione per un essere vivente e perché un organismo, sin dai suoi livelli più elementari, non può non trattare informazioni?

La risposta, come mostra Fabbro con rigore e chiarezza, è tutt'altro che scontata. Comprendere l'informazione implica ripensare la vita non come un fenomeno chimico isolato, ma come un processo continuo di scambio, interpretazione e trasformazione, in cui differenze vengono riconosciute, segnali si convertono in decisioni, modelli del mondo prendono forma a partire dalla materia più semplice. Significa riconoscere che l'*Escherichia coli*, tra gli organismi più elementari, è già un interprete del proprio ambiente; significa comprendere che la psiche non nasce da un salto improvviso, ma da un tessuto finissimo di comunicazioni interne; significa intuire che il linguaggio umano, con la sua sorprendente complessità, rappresenta l'esito evolutivo di un processo interamente informazionale.

È in questo contesto che risuona con particolare forza l'osservazione dell'autore secondo cui l'informazione è prima di tutto

Prefazione

una caratteristica degli esseri viventi, reperibile in tutti i livelli organizzativi della vita. Questa non è una semplice enunciazione teorica, ma un invito a trasformare il nostro sguardo: ciò che chiamiamo vita è un flusso di segnali che si articolano, si selezionano e si modulano lungo una dinamica che attraversa cellule, organismi, sistemi nervosi, psiche e linguaggio. L'intero volume è orientato da questa tesi, che sposta l'attenzione dal supporto materiale alla struttura organizzativa del vivente, mostrando come l'informazione sia la logica interna che connette e regge i diversi piani della realtà biologica.

Leggere queste pagine significa penetrare nell'officina segreta della vita, dove si scopre che ogni organismo, anche il più fragile, è un artigiano di informazione impegnato in un lavoro ininterrotto di selezione, filtraggio, memoria e anticipazione; dove si comprende che l'ordine del vivente nasce contro l'entropia attraverso strategie raffinate depositate dall'evoluzione; e dove si riconosce che la tecnica contemporanea, dai computer alle reti neurali, non fa che riprodurre con mezzi differenti e spesso opachi processi che la natura svolge da miliardi di anni.

Ma soprattutto, si comprende che la domanda sull'informazione non appartiene soltanto al nostro tempo digitale. È la do-

manda originaria su ciò che permette alla vita di persistere, adattarsi, immaginare, comunicare e trasformare il mondo. È una domanda che riguarda la nostra mente, le nostre relazioni, la forma sociale che costruiamo e, in ultima analisi, la nostra stessa collocazione nel cosmo. Interrogare l'informazione significa interrogare la condizione umana.

Questo libro non si limita a offrire risposte, ma invita il lettore a cambiare sguardo, a concepire la vita come un'immensa trama di segnali, codici, forme e significati, e a riconoscere che comprendere l'informazione significa comprendere l'architettura stessa dell'umano nella sua intera complessità. Nel tempo delle macchine intelligenti, nulla è più urgente del ritrovare il fondamento biologico da cui tutto ha avuto origine.

Luca Taddio
24/11/2025

1. INTRODUZIONE

Nel titolo di questo saggio sono presenti tre parole: “filosofia”, “informazione” e “biologia”. Si tratta di parole che rimandano a complessi contenuti culturali e scientifici. La filosofia in Occidente ha una lunga storia, focalizzata in particolare sulla riflessione critica a riguardo delle possibilità conoscitive umane, e sul significato dell’esistenza umana e del cosmo. Il concetto più recente è quello di “informazione”, l’analisi di questa nuova entità così diffusa ma, allo stesso tempo, così enigmatica occuperà gran parte di questo saggio. L’ultimo concetto è quello riferito alla “biologia”, cioè alle discipline scientifiche che si occupano di definire le caratteristiche generali degli organismi viventi e delle loro funzioni.

In un famoso saggio pubblicato nel 1944 e intitolato *Che cos’è la vita?* il celebre fisico austriaco Erwin Schrödinger (1887-1961) cercò di definire le caratteristiche degli organismi viventi rispetto alla “materia inerte”. Gli elementi fondamentali che

compongono gli organismi e la materia non vivente sono gli stessi; infatti, tutto l'universo conosciuto è composto da particelle elementari e atomi. Ciò che caratterizza il vivente, secondo Schrödinger, è la presenza di un "ordine" e di una "complessità" molto elevata (in termini termodinamici di una elevata entropia negativa) in spazi delimitati e auto-organizzati chiamati "organismi viventi" (unicellulari o pluricellulari)¹. Per spiegare lo sviluppo e il funzionamento di un organismo vivente, Schrödinger giunse a ipotizzare l'esistenza all'interno degli organismi di un "testo in codice" nel quale era rappresentato il progetto di costruzione e di funzionamento dell'essere vivente stesso². In questo celebre saggio Schrödinger è stato in grado di riconoscere alcune caratteristiche fondamentali che distinguono gli organismi viventi dalla materia inerte, ma nell'anno della sua pubblicazione, nel 1944, il problema della vita rimaneva ancora sostanzialmente irrisolto!

Soltanto trent'anni dopo, in un convegno tenutosi a Venezia sotto l'egida dell'UNESCO, Jacques Roger (1920-1990), docente di Storia del pensiero scientifico all'Univer-

¹ Schrödinger 1944, pp. 118-127.

² Ivi, pp. 44-45.

sità della Sorbona di Parigi, concludeva il suo intervento dal titolo: *Teoria dell'informazione e storia della vita*, sostenendo che il filosofo di origine austriaca Ludwig Wittgenstein (1889-1951), nel *Tractatus Logico-Philosophicus* (1921), aveva affermato che il problema della vita sarebbe stato risolto quando esso sarebbe scomparso³. Ebbene nel 1973 secondo Roger: “*Il problema della vita oggi è scomparso. Resta quello della sua storia*”⁴.

Che cosa è successo in questi trent'anni che aveva permesso di risolvere il problema della vita? Nei primi anni Cinquanta si era realizzata quella che può essere considerata come la più grande scoperta scientifica del novecento, anche se la maggior parte degli scienziati (fisici) e dei filosofi non se ne è accorta⁵! Un giovane biologo statunitense James Watson (1928-2025) e un fisico inglese Francis Crick (1916-2004) nel 1953 erano riusciti a descrivere la struttura dell'acido desossiribonucleico (DNA), che costituisce il “testo in codice”, cioè la memoria delle “informazioni” necessarie per duplicare (riprodurre) e per permettere il funzionamento di

³ Wittgenstein 1921.

⁴ Roger 1974, p. 240.

⁵ Fabbro 2024, pp. 13-18.

un organismo vivente (a partire da quelli più semplici: i batteri, fino ai più complessi organismi pluricellulari, inclusi gli esseri umani)⁶.

Si è trattato di una delle scoperte scientifiche più importanti del Novecento, accanto alle più note e celebrate teoria della relatività e meccanica quantistica. Tuttavia, l'impatto a livello culturale e filosofico delle due teorie fisiche (relatività e meccanica quantistica) è stato enorme, mentre la scoperta del DNA e degli altri processi biologici coinvolti nella regolazione della vita è passata inosservata. La biologia è una disciplina molto più complessa della fisica e per questa e molte altre ragioni risulta essere molto meno interessante per i filosofi, i quali fin dalle origini – a partire da Pitagora e Platone – hanno mostrato molto più interesse per le discipline logiche e geometrico-matematiche, che apparivano più rigorose e fonte di maggiori certezze.

La scoperta della struttura del DNA da parte di Watson e Crick ha dato il via a una cascata di ricerche che hanno permesso di comprendere il “codice genetico” e alcune modalità fondamentali di replicazione e funzionamento delle cellule, presenti in tutti gli organismi, ossia nei batteri, nelle cellule eucariote, nei funghi, nelle piante e

⁶ Watson e Crick 1953; Watson 1968; Crick 1988.

Introduzione

negli animali. In particolare, sono stati descritti i principali processi di trascrizione, traduzione e regolazione delle informazioni contenute nel DNA, a loro volta coinvolti nella realizzazione delle proteine, elementi fondamentali nell'organizzazione strutturale e funzionale delle cellule.

La scoperta del codice genetico e della struttura del DNA (insieme a numerosi altri processi di regolazione cellulare) ha permesso di comprendere il ruolo fondamentale giocato dall'informazione nei processi biologici. Ovvero come l'informazione biologica necessiti di una "struttura fisica" (formata dai quattro tipi di nucleotidi), ma che la caratteristica principale dell'informazione sia di "natura immateriale", sia cioè collegata all'ordine della sequenza dei nucleotidi. Ciò significa che l'informazione genetica, come tutti gli altri tipi di informazione può essere veicolata da supporti completamente differenti (nucleotidi, lettere dell'alfabeto, codice binario, eccetera).

Oltre al livello genetico e cellulare, l'informazione svolge un ruolo fondamentale anche a livello dei diversi organi e apparati che compongono un organismo multicellulare (piante, funghi e animali). Inoltre, negli animali dotati di sistema nervoso (ad esempio nei vertebrati, negli insetti, nei molluschi, nei nematodi) sono presenti modalità di "trasmis-

sione” delle informazioni di tipo analogico e di tipo digitale. La psiche stessa rappresenta un complesso processo di natura informazionale. Infine, il linguaggio, presente negli esseri umani, appare come uno dei più sofisticati sistemi di condivisione delle informazioni.

Dunque, l'informazione è prima di tutto una caratteristica degli esseri viventi, reperibile in tutti i livelli organizzativi della vita (cioè nel livello delle macromolecole, delle cellule, degli organismi multicellulari, degli organi e apparati, del sistema nervoso, della psiche e del linguaggio). Ovviamente l'informazione è presente anche nelle macchine costruite da esseri senzienti. Una volta poste queste premesse si evidenzia con chiarezza il ruolo centrale che le discipline biologiche (biologia cellulare, neuroscienze, psicologia e linguistica) possono e devono giocare all'interno di una rinnovata riflessione filosofica. Le conoscenze relative agli elementi strutturali della materia (micro e macrofisica) pur essendo necessarie non sono sufficienti per avvicinarsi alla complessità del vivente; una complessità che trova il suo fondamento interpretativo nell'informazione, una entità di natura essenzialmente immateriale.

Franco Fabbro

Livorno, novembre 2025

2. BIOLOGIA E VITA

Dopo le scoperte realizzate negli ultimi decenni dalla biologia cellulare è stata raggiunta un'idea sufficientemente chiara di che cosa sia la vita. Ciò che differenzia il “vivente” dal “non vivente” è la presenza di un ambiente circoscritto (l'interno della cellula) di una serie di processi metabolici di demolizione e di sintesi di nuove molecole (proteine, trigliceridi, carboidrati, acidi nucleici) che permettono all'organismo di sopravvivere e di riprodursi¹. Ernst Mayr (1904-2005), uno dei più importanti biologi dello scorso secolo, ha sostenuto che la “vita” non è una “cosa” ma è un “processo”². In realtà, già alcuni grandi filosofi dell'antichità, come Eraclito e Buddha, avevano sostenuto che tutte le “cose” dell'universo non erano dei veri e propri “oggetti” ma piuttosto dei processi (più o meno lenti)³. I processi che ca-

¹ de Duve 2002, p. 111.

² Mayr 1997.

³ Gombrich 2009, p. 171; Reale 2007, pp. XXVI, Fabbro 2021a, pp. 360-361.

ratterizzano la vita sono in genere più veloci di quelli che riguardano la così detta “materia inerte”. La vita si realizza attraverso la generazione di strutture molto complesse, auto-organizzate e lontane dall’equilibrio, in grado di autosostenersi per un determinato periodo di tempo⁴.

Poiché la vita proviene dalla vita, si ritiene che tutti gli organismi viventi presenti sulla Terra originino da un unico organismo primordiale, conosciuto come *Last Universal Common Ancestor* (LUCA), che era formato da un’unica cellula, simile a quella dei batteri, e si stima sia comparso sul nostro pianeta più di quattro miliardi di anni fa⁵. Peter Hoffmann, docente di biofisica all’università di Detroit, ha suggerito un’utile metafora per comprendere gli organismi viventi. A suo parere è possibile considerare gli organismi viventi come dei “processi dinamici” formati da una *componente hardware*, che costituisce la struttura chimico-meccanica delle cellule (costituita da macromolecole complesse come i lipidi, gli zuccheri e le proteine) e da un *programma*, che si è evoluto nel corso di miliardi di anni e che presenta delle caratteristiche tipi-

⁴ Cramer 1988, p. 146.

⁵ Crick 1981, Davies 2000.

che: è auto-adattivo, decentralizzato, massivamente parallelo e in continua interazione con l'ambiente esterno⁶.

Il più semplice organismo vivente si differenzia dai substrati non-viventi perché possiede una struttura (*forma*) e degli scopi (sopravvivere, riprodursi ecc.). L'organismo vivente è in costante interazione con l'ambiente, con il quale – come si è detto – scambia substrati (e informazioni). L'origine degli organismi ha determinato un radicale mutamento del mondo. François Jacob (1920-2013), nel suo libro *La logica del vivente* (1970), ha ampliato le riflessioni sulla struttura organizzativa degli esseri viventi sviluppate inizialmente da Ervin Schrödinger. Egli è partito dall'analisi degli organismi più semplici: i batteri. Come è noto, essi sono composti da una membrana lipidica a due strati, in grado di separare la cellula dall'ambiente circostante. La membrana è impermeabile a determinate sostanze: alcuni minerali possono passare liberamente, mentre altri vengono mantenuti in equilibrio attivo mediante particolari complessi proteici (ad esempio le pompe sodio-potassio).

I batteri sono i primi organismi viventi comparsi sulla terra. In essi è presente

⁶ Hoffmann 2012, p. 280.

un'architettura cellulare che tende a ripetersi in tutti gli altri organismi viventi (unicellulari o pluricellulari). L'organizzazione della cellula prevede: 1) una membrana citoplasmatica, che separa l'ambiente interno da quello esterno; 2) un certo numero di proteine (enzimi), che intervengono nei processi metabolici; 3) una catena composta da acidi nucleici (DNA o RNA) che costituiscono l'*informazione genetica* in grado di riparare e/o duplicare l'organismo. Inoltre, per riuscire a mantenere un livello sufficiente di stabilità tutti i sistemi autorganizzati, inclusi gli organismi viventi, debbono essere in grado di sviluppare processi di autoregolazione che si basano su anelli di retroazione (*feedback negativi*). Ciò significa che gli organismi viventi sono delle entità biologiche che hanno a che fare con la dimensione del "tempo", poiché nello stato presente devono tener conto (almeno a livello implicito) anche del *futuro*⁷.

Da un punto di vista termodinamico gli esseri viventi sono dei sistemi autorganizzati in grado di mantenere il loro ambiente interno lontano dall'equilibrio mediante un continuo flusso di energia che origina primariamente dalla luce solare. Tutti gli

⁷ Smolin 1997, p. 197 e p. 241.

organismi viventi (batteri, funghi, piante e animali) sono in grado di mantenere la loro struttura (ordinata e a bassa entropia) scambiando materia, energia (e informazioni) con il mondo esterno. L'ordine (la bassa entropia) presente negli organismi viventi viene mantenuto a spese di un aumento costante dell'entropia nel sistema completo (organismo + mondo esterno). Fintanto che le riserve esterne di massa ed energia saranno sufficienti i sistemi viventi potranno mantenere uno stato stazionario di "non equilibrio". Secondo Ilya Prigogine (1917-2003) gli organismi viventi possono mantenere la loro struttura e le loro funzioni (ordine) perché sono "sistemi aperti" e "strutture dissipative", cioè strutture che agiscono in una condizione termodinamica lontana dall'equilibrio. L'esistenza di sistemi aperti e di strutture dissipative è presente soltanto a livello macromolecolare (cioè dei lipidi, degli zuccheri e delle proteine), mentre non è presente a livello atomico⁸.

Il secondo principio della termodinamica – considerato il più generale e il più potente principio della scienza – sostiene che tutti gli scambi termici sono caratterizzati da una

⁸ Prigogine 1979; Cramer 1988.

crescita progressiva dell'entropia, cioè da un aumento progressivo del disordine⁹. Nonostante ciò, gli organismi viventi riescono a mantenere ordinate le loro complesse strutture e funzioni. Gli ordinamenti che caratterizzano gli organismi viventi presentano una struttura gerarchica di complessità crescente (dal livello cellulare a quello multicellulare, fino all'ambito sociale). L'organizzazione strutturale degli esseri viventi determina una serie di vincoli nella liberazione di energia. Tali vincoli sono in grado di canalizzare il lavoro e di ridurre l'aumento di entropia. “Questa canalizzazione del lavoro è parte del modo in cui la vita “prevale” sul secondo principio della termodinamica. A causa dei vincoli, l'entropia aumenta comunque, ma più lentamente”¹⁰. Ciò significa che, nonostante gli organismi viventi siano dei sistemi in grado di mantenere strutture sufficientemente ordinate, tuttavia il disordine cresce più lentamente ma in maniera inesorabile, per questa ragione gli organismi viventi si trovano costantemente in bilico tra *vivere* (essere) e *morire* (non essere)¹¹.

⁹ Eddington 1928, p. 74; Barrow 1988, p. 162.

¹⁰ Kauffman 2019, p. 29.

¹¹ Jonas 1994, pp. 10-11; Villarreal 2020, p. 6.

3. L'ORIGINE DEL CONCETTO DI INFORMAZIONE

Negli anni Quaranta dello scorso secolo, Vannevar Bush (1890-1974) – direttore del National Defense Research Committee degli Stati Uniti d'America, affidò a Norbert Wiener (1894-1964) – un professore di matematica del Massachusetts Institute of Technology (MIT) di Boston – il compito di sviluppare dei sistemi di artiglieria contraerea automatici (centrali automatiche di tiro a previsione)¹. Fin dai primi anni del suo insegnamento universitario Norbert Wiener si era dedicato allo studio dei fondamenti matematici della meccanica statistica, una disciplina inaugurata da Ludwig Boltzmann (1844-1906) e divulgata a livello scientifico da Josiah W. Gibbs (1839-1903), autore di un significativo manuale intitolato: *Principi elementari di meccanica statistica* (1902). La meccanica statistica rappresentava un superamento della fisica newtoniana in quanto

¹ Wiener 1950, p. 86.

introduceva nell'ambito della meccanica i concetti di “caso” e “probabilità”.

3.1 Norbert Wiener e la cibernetica

La costruzione di un sistema di artiglieria contraerea automatizzata richiedeva lo sviluppo di una nuova teoria scientifica, che Wiener propose di chiamare “cibernetica”. Per colpire un bombardiere che volava a 10.000 metri d'altezza, con una velocità di 500 km/h era necessario riuscire a “prevedere” dove si sarebbe trovato l'aereo quando il proiettile dell'artiglieria avrebbe raggiunto la quota di volo, ossia dopo circa 12 secondi dall'esplosione del colpo. In questo lasso di tempo, il bombardiere si spostava di circa un chilometro e mezzo dal punto in cui si trovava all'esplosione del colpo. Uno dei primi obiettivi del sistema elettromeccanico progettato da Wiener consisteva nella capacità di “fare previsioni del futuro”; per questo motivo Wiener dovette sviluppare una teoria matematica predittiva². Inoltre, nel caso in cui l'aereo non fosse stato colpito, il pilota avrebbe reagito iniziando a produrre variazioni imprevedibili e irregolari della

² Wiener 1948, p. 13.

rotta che dovevano essere presi in considerazione nella teoria predittiva³.

Ben presto Wiener si rese conto che una teoria predittiva non era sufficiente per costruire un sistema di contraerea automatizzata. Era necessario informare il sistema elettro-meccanico sull'esito del colpo precedente prima di poter prevedere (calcolare) il bersaglio successivo. La centrale di tiro doveva essere dotata di un sistema in grado di calcolare la "differenza" tra una predizione (le coordinate in cui era stato ipotizzato trovarsi l'aereo) e il punto in cui l'aereo si era effettivamente trovato (le coordinate reali dell'aereo all'arrivo del proiettile), doveva cioè contenere un sistema di *feedback* negativo (retroazione negativa)⁴. Lo sviluppo del radar (*Radio Detection and Ranging*), un dispositivo in grado di identificare degli oggetti metallici in movimento, aveva reso possibile il calcolo di questa "differenza".

Il feedback negativo è un sistema di retroazione in grado di stabilizzare un valore

³ Wiener 1950, p. 87.

⁴ "La retroazione può essere meccanica [...] oppure elettrica: in ogni modo, l'elemento chiave nel processo è l'informazione. Ciò che regola l'artiglieria contraerea, per esempio, è informazione sulle coordinate dell'aereo bersaglio e sulla posizione precedente del velivolo" (Gleick 2011, p. 220).

quando si modifica in maniera eccessiva, permettendo di ritornare ai livelli medi. La retroazione negativa è in grado di produrre un cambiamento in direzione opposta allo stimolo iniziale (correzione basata sul feedback), allo stesso tempo presenta alcuni punti di contatto con la “chiusura organizzativa del sistema”⁵. Il feedback negativo è una modalità di funzionamento molto diffusa sia negli organismi biologici (dove serve a garantire l'omeostasi a livello cellulare, come pure nei diversi sistemi che compongono un organismo pluricellulare, come ad esempio il sistema endocrino, il sistema nervoso, eccetera), sia nei dispositivi meccanici, elettrici ed elettronici.

Durante la progettazione delle centrali automatiche di tiro a previsione Norbert Wiener riuscì a rendersi conto, attraverso

⁵ Il concetto di chiusura organizzativa è stato studiato utilizzando alcune teorie matematiche delle funzioni ricorsive. In queste teorie vengono analizzate delle “operazioni che operano iterativamente sul proprio risultato, cioè sono operazionalmente chiuse. Alcune delle conclusioni di questa teoria sono direttamente associate a concetti come auto-organizzazione, equilibrio stabile, instabile, multiplo e dinamico [...] tuttavia il concetto di chiusura operativa ha sempre comportato dei problemi logici di qui la riluttanza a occuparsi di alcuni dei suoi aspetti più problematici” come ad esempio il famoso paradosso presente nella frase: “Io sono bugiardo”; cfr. von Foerster 1981, pp. 201-202.



L'origine del concetto di informazione

una serie di riflessioni filosofiche estremamente significative, che nei sistemi elettromeccanici adibiti al calcolo delle previsioni di tiro e alla elaborazione dei dati provenienti dai processi di retroazione negativa non circolavano soltanto deboli correnti elettriche ma anche una “entità” del tutto nuova ed enigmatica, che propose di chiamare “informazione”⁶. Si trattava di qualcosa che a suo parere si situava al di là dei concetti fisici ordinari perché l’“informazione”, pur utilizzando dei supporti materiali, non è “né materia, né energia”⁷.



3.2 Walter Cannon e il concetto di omeostasi



Uno dei dispositivi più comuni in cui è presente un feedback negativo è il regolatore automatico della temperatura, detto “termostato”; un dispositivo presente in tutti gli appartamenti dotati di impianti di riscaldamento. Il termostato è un sistema composto da un misuratore di temperatura (termometro) e da una centralina (dotata di istruzioni) in grado di provvedere all’accensione e allo

⁶ Montagnini 2015; Fabbro 2021b; 2023.

⁷ Wiener 1948, p. 199; cfr. Gleick 2011, p. 220; Bynum 2016, pp. 203-204.



spegnimento dell'impianto di riscaldamento. Se desideriamo avere una temperatura costante di 20 gradi centigradi, questa temperatura viene fissata sul termostato (che può essere costituito da un sistema elettromeccanico o elettronico). Per ogni intervallo di tempo stabilito (ad esempio ogni 10 secondi), il termometro misurerà la temperatura, se essa è superiore a 20°C l'impianto verrà spento. Se la temperatura diminuirà, ad esempio si porterà a 18°C il sistema: 1) misurerà la "differenza" tra la temperatura desiderata (T_d) e la temperatura presente (T_p) [$T_d - T_p = + 2^\circ\text{C}$]; 2) invierà questa differenza alla centrale di comando del termostato (dove sono presenti delle "istruzioni", come ad esempio: accendere l'impianto fino a quando la differenza di temperatura è superiore a $0,1^\circ\text{C}$); 3) verrà mantenuto acceso l'impianto finché la differenza di temperatura (tra quella presente e quella desiderata è superiore a 0,1 gradi). In questa maniera il "termostato" opera un controllo automatico della temperatura, permettendo una "chiusura organizzativa del sistema"⁸.

Il termine "omeostasi" fu utilizzato per la prima volta dal fisiologo Walter B. Cannon (1871-1945), un amico di famiglia di

⁸ Maturana e Varela 1972, pp. 90-95.

Norbert Wiener. Cannon in un suo celebre libro intitolato *La saggezza del corpo* (1932)⁹ descrisse i processi dell'omeostasi, che permettono a un organismo di mantenere invariate alcune caratteristiche fondamentali (come la temperatura, la glicemia, la pressione arteriosa) nonostante il continuo mutamento dell'ambiente che tende ad alterare tali caratteristiche fisiologiche. L'omeostasi costituisce quell'insieme di processi – molti dei quali sono dei feedback (negativi o positivi) – in grado di stabilizzare le funzioni vitali di un organismo. Secondo il neurobiologo e filosofo inglese John Zachary Young (1907-1997) un organismo vivente mantiene l'omeostasi grazie a una serie di componenti come: 1) i “recettori” in grado di registrare i mutamenti che avvengono nell'ambiente; 2) i “canali di comunicazione” che permettono di trasmettere le variazioni registrate (segnali afferenti); 3) un “sistema di calcolo” che elabora i segnali afferenti e produce un segnale in uscita (segnale efferente); 4) i canali di comunicazione dei segnali efferenti; 5) degli attuatori che intervengono nel mondo fisico. L'organismo (sistema) deve infine possedere 6) un “insieme di istruzioni” sul tipo di cose che deve essere in grado di fare, e come

⁹ Cannon 1932.

deve operare a ciascun livello della sua organizzazione. Infatti, secondo Young: “Uno dei problemi fondamentali della biologia è di trovare il modo di descrivere il processo di “adattamento” attraverso il quale ciascun singolo organismo raggiunge uno stato particolare e sopravvive per un certo tempo nel suo ambiente”¹⁰.

¹⁰ Young 1964, p. 21.

4. MATEMATICA DELLA COMUNICAZIONE E INTELLIGENZA ARTIFICIALE

Nel 1949 Claude Shannon (1916-2001) e Warren Weaver (1894-1978), due matematici statunitensi che durante la Seconda guerra mondiale erano stati coinvolti in numerosi progetti scientifici applicati al settore militare, pubblicarono un libro intitolato: *The Mathematical Theory of Communication*, che ebbe un'enorme influenza sullo sviluppo dei calcolatori digitali e sull'origine dell'informatica.

Nel loro libro Shannon e Weaver sostenevano che la “comunicazione” consisteva nella capacità di riprodurre in un punto (A), in maniera esatta o approssimativa, un “messaggio” che era stato selezionato in un altro punto (B)¹. I due punti potevano essere separati nello spazio oppure nel tempo. Infatti, la conservazione delle informazioni nel tempo (memoria) veniva considerata come una forma di comunicazione². Nel

¹ Shannon e Weaver 1949, p. 31.

² Gleick 2011, p. 205.

modello sviluppato da Shannon e Weaver la comunicazione veniva considerata come un tipo particolare di trasporto. In genere, la parola “trasporto” viene utilizzata per descrivere il trasferimento di materia o energia da un punto a un altro. Invece, nel caso della comunicazione ciò che viene trasferito dal punto A al punto B non è né materia né energia ma informazione³.

4.1 Una teoria matematica della comunicazione

Shannon aveva sviluppato una teoria matematica della comunicazione che aveva come modello il telegrafo⁴. La rappresentazione matematica di questa teoria prevedeva una serie di elementi semplificati e visualizzati attraverso uno schema lineare costituito da: 1) una “sorgente di informazioni” (che può essere una persona o una macchina) responsabile della generazione del “messaggio”; 2) un “sistema codificatore” (nei sistemi telegrafici le lettere dell’alfabeto sono trasformati attraverso il codice Morse in una sequenza di punti, linee e spazi); 3) un “emettitore” (che produce il segnale);

³ Escarpit 1976, p. 12.

⁴ Shannon e Weaver 1949, pp. 32-35.

4) un “canale” che rappresenta il mezzo per trasmettere il segnale; 5) un “ricevitore” che inverte l’operazione eseguita dall’emettitore; 6) un “decodificatore” (che trasforma le sequenze di punti, linee e spazi in lettere dell’alfabeto); 7) un “destinatario” che riceve il messaggio trasmesso.

Il modello matematico sviluppato da Shannon rappresenta una forma molto semplificata della comunicazione poiché non sono coinvolti gli aspetti semantici, considerati irrilevanti dalla prospettiva ingegneristica, né quelli pragmatici⁵. Nonostante questi limiti la teoria sviluppata da Shannon ebbe un effetto scientifico e tecnologico dirompente.

Il modello elaborato consisteva di componenti cognitivo-linguistiche, simboliche e fisico-matematiche. Ad esempio nel caso del telegrafo la sorgente di informazione era costituita da un individuo in grado di generare un messaggio costituito da frasi o parole. Il sistema codificatore trasformava i simboli verbali (lettere dell’alfabeto) in punti, linee e spazi (codice Morse). Questi punti, linee e spazi del codice Morse venivano trasformati in opportuni segnali elettrici che correvano lungo le linee telegrafiche. Alla fine il ricevi-

⁵ Ivi, p. 8; Gleick 2011, p. 210.

tore e il decodificatore erano in grado di ricostruire il messaggio originario, che veniva consegnato al destinatario.

La fonte di informazioni genera il messaggio e lo codifica in una serie di “simboli”, ad esempio quando intendiamo esplicitare che siamo assetati (messaggio) possiamo formulare la frase: “Ho sete” (codificazione in parole della lingua italiana, composte da sei lettere). Le lettere dell’alfabeto possono essere codificate in un secondo sistema (codice Morse, oppure in codice ASCII), utile per trasmettere dei segnali elettrici. Un “codice” è una relazione che lega i simboli di un alfabeto (ad esempio le lettere dell’alfabeto latino: a, b, ... z) ai simboli di un altro alfabeto (ad esempio le lettere dell’alfabeto greco, il codice binario).

4.2 Come misurare l'informazione

Nel 1928 Ralph Hartley (1888-1970) – un ricercatore che lavorava presso i Bell Laboratories –aveva pubblicato un modello matematico per misurare la quantità d’informazione trasmessa in un sistema di comunicazione⁶. Hartley partiva dal ragio-

⁶ Hartley 1928.

namento che durante una comunicazione erano sempre coinvolti dei simboli (fonemi, lettere dell'alfabeto, sequenze di punti e linee), che per comune accordo veicolano dei significati. A suo parere (come successivamente per Shannon) si potevano contare i simboli senza curarsi del significato. Ciascun simbolo rappresenta una scelta tra un insieme di simboli possibili. La "quantità di informazione" trasmessa era quindi proporzionale al numero di simboli possibili. Per misurare questa quantità Hartley propose la seguente formula: $H = n \log s$; dove "H" rappresenta la quantità di informazione, "n" il numero di simboli trasmessi e "s" la dimensione dell'alfabeto (numero di lettere dell'alfabeto presenti in una lingua). Si evince che la quantità di informazione trasmessa è in relazione logaritmica con le dimensioni dell'alfabeto.

Norbert Wiener, nel suo libro *La cibernetica* (1948), aveva avanzato per la prima volta l'idea che l'informazione e l'entropia fossero collegate tra di loro. Nel capitolo introduttivo di questo libro Wiener sostiene che: "Il concetto di quantità di informazione si collega naturalmente a un concetto classico della meccanica statistica: quello di entropia. Come la quantità di informazione in un sistema è una misura del suo

grado di organizzazione, così l'entropia di un sistema è una misura del suo grado di disorganizzazione; l'una è semplicemente il negativo dell'altra"⁷.

Shannon, ponendosi sulla scia di Hartley, propose di separare l'informazione dal contenuto semantico. A questo punto l'informazione di un messaggio si associava all'"incertezza", quest'ultima era in relazione con il numero di messaggi possibili. Se era possibile un solo messaggio non vi era informazione. Nel libro citato sopra, Wiener aveva sostenuto che "una delle più semplici e più elementari forme di informazione consisteva nella registrazione della scelta tra due alternative semplici, ugualmente probabili, una delle quali deve verificarsi; per esempio la scelta fra testa e croce nel lancio di una moneta"⁸. L'informazione veniva collegata alla "probabilità"; un messaggio meno è probabile, più è informativo.

Infine, l'informazione è stata collegata all'entropia. "Trasmettere informazione si-

⁷ Wiener 1948, p. 20. cfr. Roger 1974, p. 225; Bynum 2016, p. 204. In questa citazione Wiener considera l'informazione collegandola al concetto di "ordine"; invece Harley e Shannon considerano l'informazione come collegata all'entropia termodinamica.

⁸ Wiener 1948, p. 92.

gnifica trasmettere ordine. [...] un messaggio (cioè una sequenza di segni) trasmette tanta più informazione (cioè tanto più ordine) quanto maggiore è la sua entropia, cioè il suo potenziale disordine”⁹. Vittorio Silvestrini, nel suo libro *Che cos'è l'entropia?* riporta a questo riguardo l'esempio della combinazione segreta di una cassaforte. La combinazione risulta essere tanto più preziosa (informativa) quanto maggiore è il numero di cifre che la compongono, poiché aumentando il numero delle cifre diventa più elevato il numero delle combinazioni possibili. L'informazione che questa combinazione “trasmette è tanto maggiore quanto maggiore è l'entropia, cioè il disordine, con cui deve scontrarsi chi tale combinazione non conosce”¹⁰.

Sviluppando i concetti di incertezza, probabilità ed entropia, Shannon fu in grado di elaborare un'equazione che permetteva di misurare la quantità di informazione rappresentata in un messaggio, indipendentemente dal suo significato. L'equazione sviluppata da Shannon permetteva di calcolare l'“entropia informazionale” H , definita anche come “entropia di un messaggio”,

⁹ Silvestrini 2011, p. 69.

¹⁰ *Ibid.*

“entropia di Shannon”, o semplicemente “informazione”¹¹. A questo punto era necessario sviluppare un’*unità di misura* per definire l’informazione. Riprendendo alcune idee sviluppate inizialmente da Wiener¹², Shannon ebbe l’idea di pensare all’informazione come a qualcosa che ci permette di rispondere a una domanda in cui sono possibili soltanto due risposte equiprobabili: “sì” oppure “no”. La risposta può assumere soltanto due valori: 1 (sì) oppure 0 (no). In questo modo ogni domanda corrisponde a una “cifra binaria”, un (*bi*)*nary digi(t)*, cioè a un “bit”.

Con questo metodo di misura è possibile definire il numero che una persona sta pensando (tra 1 e 1000) attraverso una serie di domande cui la persona può rispondere con un “sì” oppure con un “no”. Le domande possono iniziare come segue: il

¹¹ Secondo l’equazione sviluppata da Shannon “l’entropia di una fonte è uguale a meno la somma della probabilità di ciascuno dei segni di cui la fonte dispone, moltiplicata ciascuna per il suo logaritmo” (Escarpit 1976, p. 29). Nel caso dei sistemi di segni binari si utilizzano i logaritmi in base 2 e il risultato sarà espresso in bit. “Il bit è la quantità di informazione contenuta da una fonte che disponga di due segni equiprobabili” (Escarpit 1976, p. 29; cfr. Gleick 2011, pp. 210-211).

¹² Wiener 1948, p. 92.



numero a cui sta pensando è maggiore di 500? “No” (0). Il numero è minore di 250? “sì” (1), e così via. Secondo questo metodo qualsiasi domanda che possa prevedere una risposta binaria (sì o no) può essere codificata in sequenze di 1 e 0, e può essere misurata in bit. Poiché il linguaggio è costituito da una sequenza di simboli (fonemi o lettere dell’alfabeto) esso può essere rappresentato mediante una sequenza di bit. Si è potuto così constatare che ogni lettera dell’alfabeto della lingua italiana può essere codificata con 8 bit e, quindi, dato che un libro di medie dimensioni (come questo saggio) è formato da circa 200.000 caratteri, esso contiene circa 1,6 milioni di bit d’informazione¹³.

¹³ Una seconda modalità di misurare l’informazione – sviluppata nella seconda metà del secolo scorso dal matematico russo Andrej Kolmogorov (1903-1987) e dal matematico statunitense Gregory Chaitin – utilizza il “metodo algoritmico” (cfr. Davis 2000, p. 192; Adriaans e van Benthem 2008). Gli “algoritmi” sono procedure astratte per risolvere problemi. Secondo questo metodo la complessità di un “oggetto” dipende dal più piccolo programma (sequenze di istruzioni che descrivono le operazioni di un algoritmo) in grado di generarlo. Un oggetto semplice richiederà un algoritmo descritto da pochi bit, mentre un oggetto complesso richiederà un algoritmo descritto da molti bit. Con questo metodo è facile descrivere, attraverso opportuni programmi, le competenze di calcolo di un



4.3. Entropia e informazione

Accanto alla teoria della relatività e alla meccanica quantistica, la teoria dell'informazione è stata considerata come una delle più grandi rivoluzioni scientifiche del XX secolo. Questa teoria ha cambiato in maniera radicale le tecnologie della comunicazione (computer, telefonini, social media, sistemi generativi di intelligenza artificiale), purtroppo ha influito molto di meno sulla concezione – da parte degli scienziati e dei filosofi – di che cosa sia la conoscenza e dei suoi rapporti con gli organismi viventi, con la comunicazione e con il linguaggio¹⁴.

Abbiamo accennato al fatto che la teoria matematica della comunicazione e la teoria dell'informazione si collegano alla fisica attraverso il concetto di “entropia”. Si tratta di un concetto della termodinamica sviluppato inizialmente da alcuni ingegneri in-

matematico, ma è molto più difficile (o impossibile) simulare entità del mondo fisico, come ad esempio una “mucca”. La simulazione al calcolatore di una dimostrazione matematica è equivalente a quella eseguita da un matematico in carne e ossa, mentre la simulazione al computer di una mucca non è in grado di produrre del latte vero, utile per essere utilizzato come alimentazione (Longo 1998, p. 46).

¹⁴ Hutten 1974; Seife 2006; Fabbro 2021b; 2023; 2024.

teressati al funzionamento delle macchine termiche. Nel corso del XIX secolo alcuni di questi operatori in ambito tecnologico si sono accorti che era possibile sviluppare lavoro (pompendo, trivellando, eccetera), attivando una macchina termica posta tra due contenitori, uno caldo e uno freddo. La possibilità di far funzionare una macchina termica dipende dalla differenza di calore tra i due contenitori. In altre parole quando i due contenitori vengono collegati la loro differenza di temperatura tende progressivamente a diminuire insieme alla possibilità di ottenere lavoro, mentre aumenta l'entropia del sistema.

Nella seconda metà del XIX secolo due fisici: Clerk Maxwell (1831-1879) e Ludwig Boltzmann, studiarono il comportamento dei gas come se fossero composti da miscuglio di particelle elementari (molecole), che potevano premere contro il contenitore (pressione), manifestare una certa energia cinetica (temperatura) e una certa entropia. Si accorsero che per spiegare che cosa fosse l'“entropia” era necessario introdurre un “osservatore nel proprio sistema descrittivo. [...] era necessario parlare della discernibilità (ordine) tra situazioni”¹⁵. Quando

¹⁵ von Foerster 1981, p. 196.

si mettono insieme due contenitori uno caldo e uno freddo con l'andare del tempo la distinzione tra di loro andrà perduta. "Ma sarà l'osservatore a confondersi; [...] e questa confusione (disordine) si accrescerà con l'aumentare dell'entropia"¹⁶.

Infatti, l'entropia non riguarda la posizione delle particelle, e neppure la temperatura, la pressione o il volume di un gas; l'entropia si riferisce alla nostra mancanza di informazione. Già Boltzmann aveva stabilito che l'entropia era uguale a zero quando l'osservatore sapeva tutto di un sistema, mentre quando sapeva il meno possibile l'entropia raggiungeva il valore massimo. In altre parole l'"entropia" è una "misura della nostra ignoranza sui dettagli dei moti delle molecole di un sistema"¹⁷.

Per riuscire a spiegare il concetto di entropia Ludwig Boltzmann ha dovuto ricorrere alla dimensione cognitiva dell'osservatore. Secondo Heinz von Foerster (1911-2002), un fisico austriaco nipote di Ludwig Wittgenstein, il ruolo giocato dall'osserva-

¹⁶ *Ibid.* Secondo Enrico Bucci "l'intuizione originaria e più profonda di Boltzmann è rimasta invariata; l'entropia termodinamica di un sistema come quello da lui descritto è una misura di microstati che sono compatibili con ciò che l'osservatore 'vede'" (Bucci 2024, pp. 18-19).

¹⁷ von Baeyer 2003, p. 124.

tore nella elaborazione del concetto di entropia è collegato al fatto che il linguaggio non è qualcosa che gli esseri umani hanno scoperto, ma è un prodotto della loro capacità creativa. Alla luce di questo, le parole “ordine” e “disordine” sono nostre invenzioni. Ciò significa che le “proprietà che si credono risiedano nelle cose si rivelano essere proprietà dell’osservatore”¹⁸. Quindi, l’“Ordine” (collegato ai concetti di Legge, Prevedibilità e Necessità) deriva dalla nostra capacità di fare deduzioni infallibili, mentre il “Disordine” (collegato ai concetti di Rumore, Imprevedibilità e Caso) deriva dalla nostra incapacità di fare deduzioni infallibili. “Ciò significa che Caso e Necessità riflettono alcune nostre capacità e incapacità, e non quelle della Natura”¹⁹.

Nell’affrontare i concetti di ordine, disordine e di entropia l’osservatore non può essere messo da parte. Gli esseri viventi sono considerati come “sistemi autopoietici”, cioè dei sistemi chiusi dal punto di vista organizzativo (chiusura sistemica); mentre dal punto di vista termodinamico sono dei sistemi aperti (cioè in grado di scambiare materia, energia e informazioni con l’am-

¹⁸ von Forester 1981, p. 200.

¹⁹ *Ibid.*



biente esterno)²⁰. La chiusura sistemica implica secondo von Foerster che l'osservatore debba essere incluso nel sistema oggetto di osservazione. Tuttavia, questa caratteristica è stata spesso ignorata, in quanto tende ad “attirare gli anatemi di una scienza che ha come propria regola l’“obiettività”. L’obiettività richiede che le proprietà dell’osservatore non rientrino nelle descrizioni delle sue osservazioni”²¹.

La necessità – avvertita per molti secoli dagli scienziati (in particolare dai fisici) – di separare in maniera rigorosa l'osservatore dall'oggetto della ricerca, ha fatto dimenticare che i ricercatori (scienziati e filosofi) sono degli organismi (dotati di un sistema nervoso complesso), in grado di elaborare una dimensione psichica e di inventare una tecnologia comunicativa come il linguaggio²². Tutti questi diversi livelli di organizzazione (organismi, sistema nervoso, psiche e linguaggio) forniscono agli esseri umani delle possibilità ma pongono anche dei limiti.

²⁰ Prigogine 1979; Maturana e Varela 1980.

²¹ von Foerster 1981, p. 201.

²² Dor 2015; Fabbro 2021a, cap. 12; Fabbro 2024, pp. 40-43.



4.4 Codici, simboli e segnali

Nei modelli della comunicazione – come quello elaborato da Shannon – la “sorgente” e il “destinatario” condividono lo stesso “codice”. Esempi di codice sono il codice Morse e il codice ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*) (tab. 4.1 e 4.3). Il messaggio prima di essere inviato dalla sorgente viene codificato in una stringa di “simboli”. I *simboli* possono essere considerati come dei segni nei quali il rapporto tra la rappresentazione e la cosa rappresentata è completamente arbitrario²³.

La parola “segno” (in greco *semeion* e in latino *signum*) si riferisce a un fenomeno da cui si possano trarre indizi, deduzioni o conoscenze che si riferiscono a un altro evento o oggetto. I filosofi medioevali sostenevano che “un segno è qualcosa che rinvia a qualcos’altro” (*aliquid stat pro aliquo*)²⁴. Il termine “simbolo” (in greco *symbolon*) significa: mettere insieme, collegare e far coincidere. In origine il simbolo designava un oggetto, una tessera, un frammento di ceramica o di metallo che veniva diviso in due parti nella

²³ Peirce 1931-1935, §228; Callaghan 1978, p. 29.

²⁴ Mazzone 2005, p. 16; Bettini 1963, pp. 41, 190.

stipula di un contratto economico o affettivo. Le persone coinvolte, il debitore e il creditore, il maestro e il discepolo, conservavano ciascuno un pezzo e quando si incontravano, avvicinando i due pezzi del *symbolon*, riconoscevano i vincoli economici o affettivi che li univano²⁵.

I simboli utilizzati nella comunicazione presentano un significante (collegato con il mondo fisico) e un significato (collegato con la dimensione mentale e semantica). Nell'ambito della linguistica il "significante" è rappresentato dalla forma acustica di una parola, ad esempio i suoni o le lettere dell'alfabeto che compongono la parola "cane", il "significato" riguarda invece il concetto (mentale) riferito alla parola cane²⁶. La teoria matematica della comunicazione si interessa soltanto al significante e alle sue caratteristiche: facilità di codificazione e decodificazione, resistenza al rumore, velocità di trasmissione. Se desideriamo inviare un messaggio telegrafico è necessario prima di tutto "trasformare" le lettere dell'alfabeto latino nei simboli del codice Morse (tab. 4.1). Le lettere dell'alfabeto, codificate nei simboli Morse, verranno

²⁵ Morel 2004, p. 17.

²⁶ de Saussure 1922; Fabbro 1996; 1999.

no inviate attraverso una serie di impulsi brevi (punto) e lunghi (linea).

Un aspetto significativo è che spesso all'origine di un processo di codificazione e al termine di un processo di decodificazione, come pure all'origine e al termine di ogni sistema di intelligenza artificiale generativa, è previsto l'intervento, più o meno differito, di esseri umani (dotati di pensiero e linguaggio)²⁷. Il ruolo centrale giocato dagli esseri umani nell'impresa conoscitiva è tale che addirittura il "linguaggio della scienza" non è – come molti ritengono – la "matematica", ma il "linguaggio naturale" (ossia una lingua naturale)²⁸. Secondo il fisico e filosofo nordamericano Lee Smolin: "La matematica è uno strumento magnifico, ma in definitiva il linguaggio che governa la scienza è il linguaggio naturale"²⁹. Infatti, poiché la scienza è sperimentale, soltanto il linguaggio naturale permette di collegare gli esperimenti (che hanno luogo al di fuori della matematica) con le teorie scientifiche (più o meno matematizzate).

²⁷ Escarpit 1976, p. 35, una significativa eccezione è rappresentata dal DNA.

²⁸ Lakoff e Núñez 2000.

²⁹ Smolin 2013, p. 253.

Filosofia dell'informazione biologica

A	.-	J	.-.-.-	S	...	2	..-.-
B	-...	K	---	T	-	3	...-
C	-.-.	L	....	U	...-	4	-
D	-..	M	--	V	...-	5	.....
E	.	N	-.	W	...-	6	.....
F	....	O	---	X	...-	7	.....
G	---	P	....	Y	....	8	.....
H	....	Q	....	Z	....	9	.....
I	..	R	...-	1	.....	0	.....

Tabella 4.1. Tabella di conversione delle lettere dell'alfabeto e dei numeri in codice Morse

Notazione decimale	Notazione in base due	
0	0000	0000
1	0000	0001
2	0000	0010
3	0000	0011
4	0000	0100
5	0000	0101
6	0000	0110
7	0000	0111
8	0000	1000
9	0000	1001
10	0000	1010

Tabella 4.2. Tabella di conversione dei numeri decimali nella notazione posizionale in base due

Matematica della comunicazione e intelligenza artificiale

A	01000001	a	01100001
B	01000010	b	01100010
C	01000011	c	01100011
D	01000100	d	01100100
E	01000101	e	01100101
F	01000110	f	01100110
G	01000111	g	01100111
H	01001000	h	01101000
I	01001001	i	01101001
J	01001010	j	01101010
K	01001011	k	01101011
L	01001100	l	01101100
M	01001101	m	01101101
N	01001110	n	01101110
O	01001111	o	01101111
P	01010000	p	01110000
Q	01010001	q	01110001
R	01010010	r	01110010
S	01010011	s	01110011
T	01010100	t	01110100
U	01010101	u	01110101
V	01010110	v	01110110
W	01010111	w	01110111
X	01011000	x	01111000
Y	01011001	y	01111001
Z	01011010	z	01111010

Tabella 4.3. Tabella di conversione delle lettere dell'alfabeto in codice ASCII

4.5 Macchine in grado di eseguire programmi

L'idea di sviluppare delle macchine in grado di eseguire calcoli complessi è molto antica. Tuttavia, la base teorica per la realizzazione dei moderni calcolatori si deve a un brillante matematico inglese, Alan Turing (1912-1954), il quale per risolvere un complesso problema logico-matematico, proposto alcuni anni prima dal matematico tedesco David Hilbert (1862-1943), decise di utilizzare una macchina teorica di sua invenzione.

Agli inizi del Novecento, Hilbert aveva sostenuto che non esistevano problemi matematici che non potessero essere risolti mediante ragionamento. Egli credeva che in matematica “non esistesse alcun problema insolubile”³⁰. Per questo motivo riteneva fosse necessario dimostrare che la matematica fosse completa, consistente e dotata di decidibilità³¹. Per Hilbert un sistema era “completo” quando ogni proposizione “vera” poteva essere dimostrata e ogni proposizione “falsa” poteva essere confutata. La “coerenza” di un sistema era data quando non venivano dimostrate proposizioni che si contraddicono (come: “ $2 + 2 = 5$ ”, oppure

³⁰ Reid 1970, p. 196.

³¹ Leavitt 2006, pp. 30-34.

“ $1 = 0$ ”). Infine, la “decidibilità” si riferiva alla possibilità di dimostrare l’esistenza di un “metodo” mediante il quale era possibile dimostrare la “verità” o la “falsità” di ogni proposizione.

Alan Turing pensò di poter risolvere il “problema della decisione” utilizzando un “processo meccanico” in grado di risolvere problemi matematici complessi; in questo modo giunse a concepire un sistema di calcolo denominato “macchina di Turing”³². Il punto di partenza del ragionamento di Turing si riferiva alla possibilità di considerare come all’interno di un sistema matematico le procedure di elaborazione di un teorema siano sviluppate dai matematici in maniera meccanica. Infatti, essi procedono dagli assiomi applicando una serie di regole. Sulla base di queste constatazioni è possibile immaginare che il lavoro dei matematici sia in tutto e per tutto simile a quello delle macchine.

Poste queste premesse teoriche, Turing cercò di immaginare una macchina che fosse in grado di simulare il comportamento di un matematico³³. Utilizzò come modello

³² Odifreddi 2012, pp. 23-28; Leavitt 2006, pp. 43-84; Hodges 1983, pp. 127-150.

³³ Hodges 1983, cap. 2.

un'ipotetica macchina da scrivere in grado di stampare simboli o di cancellarli. Scelse di utilizzare un sistema simbolico molto semplice: la notazione binaria (zero e uno). Considerò che la macchina fosse dotata di un nastro di lunghezza infinita, diviso in caselle, ciascuna delle quali poteva essere contrassegnata da un simbolo. Ipotizzò che la macchina fosse in grado di analizzare una casella alla volta e un simbolo alla volta. Inoltre, la macchina poteva ricordare alcuni simboli analizzati in precedenza. Come tutte le macchine era in grado di compiere operazioni: leggere un simbolo in una casella, scrivere un simbolo in una casella vuota, muovere la testina a sinistra o a destra, cancellare un simbolo, eccetera³⁴.

Si trattava di una serie di compiti simili a quelli realizzati da alcune macchine fisiche (come le macchine da scrivere). Attualmente questi compiti sono realizzati nei computer da sistemi fisici che vengono definiti come *hardware*. Secondo Turing, oltre alle caratteristiche fisiche, una macchina automatica doveva essere dotata di un "programma di istruzioni", cioè una tavola di istruzioni in grado di specificare il comportamento della macchina stessa, che ora chiamiamo *softwa-*

³⁴ Gleick 2011, pp. 189-197.

re³⁵. Il programma deve dire alla macchina come comportarsi, se deve cancellare un simbolo, oppure scriverne uno in una casella vuota, muoversi in uno spazio verso destra, o in uno spazio a sinistra. Ogni programma sarà caratterizzato da un numero finito di azioni e da un insieme finito di istruzioni.

Turing si accorse che la macchina automatica che aveva immaginato era in grado di eseguire qualsiasi programma, e di portare a termine tutte le operazioni che è in grado di eseguire un matematico durante i suoi calcoli. Tale macchina era in grado di eseguire qualsiasi funzione calcolabile e qualsiasi algoritmo informatico. Inoltre, la stessa macchina poteva elaborare programmi (*software*) differenti, era cioè una “macchina universale”, ossia “una macchina in grado di emulare, di simulare qualsiasi programma che gli veniva dato”³⁶.

Dopo avere ideato questo sistema inusuale di calcolo Turing lo applicò al “problema della decisione” riuscendo a dimostrare che ci sono alcune attività che una macchina automatica non è in grado di eseguire³⁷. Egli descrisse i risultati della sua ricerca in un

³⁵ Hodges 1983, p. 148.

³⁶ Odifreddi 2012, p. 27.

³⁷ Davis 2000, pp. 182-214.

saggio intitolato: *On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem*, pubblicato nel 1937 sui “Proceedings of London Mathematical Society”. Pochi mesi prima un altro matematico, Alonzo Church (1903-1995), utilizzando una procedura completamente diversa, aveva dimostrato che il “problema della decisione” (*Entscheidungsproblem*) era insolubile.

4.6 *L'architettura dei calcolatori*

Negli anni successivi allo sviluppo della sua macchina astratta Turing si concentrò sulla possibilità di costruire un calcolatore reale. A suo parere era necessario a) definire le operazioni fondamentali della macchina e b) creare le strutture fisiche in grado di realizzarle. Il primo di questi due passi fu compiuto dallo stesso Turing il quale precisò che le operazioni fondamentali di una macchina automatica sono le leggi della logica elementare di Boole.

Nel suo libro *An Investigation of the Laws of Thought* (1854) George Boole (1815-1864), aveva gettato le basi per permettere a delle macchine di compiere calcoli complessi seguendo degli opportuni programmi. Egli propose di distinguere le proposizioni

“vere” (rappresentate dal numero 1) da quelle “false” (rappresentate con lo 0); propose inoltre di tradurre alcune operazioni linguistiche (come la negazione, la disgiunzione, l’implicazione, eccetera) in operazioni matematiche³⁸. Ad esempio, la “negazione” che è in grado di rendere “vera” una proposizione “falsa” e di rendere “falsa” una proposizione “vera”, può essere tradotta in termini matematici come una operazione in grado di trasformare lo 0 in 1 e l’1 in 0. Tale operazione è “1–”, dato che $1 - 1$ è uguale a 0, e $1 - 0$ è uguale a 1.

Attraverso la stessa tecnica è possibile trasformare la “congiunzione” nella “moltiplicazione”. Infatti, la congiunzione di due proposizioni “vere” sarà “vera”, mentre basta che una delle due proposizioni sia “falsa” per rendere il risultato “falso”. L’operazione matematica che rappresenta la congiunzione è la moltiplicazione: $1 \bullet 1 = 1$, mentre $1 \bullet 0 = 0$ e $0 \bullet 1 = 0$. Riuscendo a trasformare le operazioni linguistiche in operazioni matematiche Boole pose le basi per la costruzione delle scienze dell’informazione.

Il secondo passo nella costruzione di un computer fu realizzato da Claude Shannon alla fine degli anni Trenta dello scorso

³⁸ Odifreddi 2012, pp. 11-13.

secolo³⁹. Shannon intuì che era possibile eseguire le operazioni fondamentali dell'algebra booleana, cioè la rappresentazione mediante simboli matematici delle proposizioni “vere” (1) e “false” (0), della negazione (“1-”), della moltiplicazione (“•”) ecc., attraverso opportuni circuiti elettronici.

Per riuscire a rappresentare le operazioni dell'algebra booleana Shannon propose di utilizzare delle porte elettriche. La “negazione” che permette di passare dall’“1” allo “0” e dallo “0” all’“1” viene realizzata da una “porta” (relè) che blocca la corrente (quando al polo di controllo è applicato un potenziale), oppure la lascia passare (quando al polo di controllo non è applicato un potenziale). In maniera analoga una “congiunzione” può essere realizzata mediante un interruttore che fa passare la corrente se entrambi i fili portano corrente e non la fa passare se uno dei due fili in entrata non porta corrente.

Il terzo e ultimo passo che portò alla realizzazione di calcolatori fu compiuto dal matematico di origine ungherese John von Neumann (1903-1957). Egli conosceva bene le caratteristiche che la “macchina universale” ideata da Turing doveva avere; cioè una

³⁹ Christian 2011, pp. 54-55.



macchina in grado di utilizzare programmi, decodificarli, simularli, eccetera. Sulla base di queste conoscenze egli disegnò l'architettura finale dei computer che si basavano in astratto sull'algebra di Boole e in concreto su una complessa serie di circuiti elettronici. Tale architettura è rimasta la stessa, i computer attuali sono soltanto più veloci, più piccoli e meno costosi dei primi dispositivi messi a punto nello scorso secolo⁴⁰.

4.7 *L'intelligenza artificiale*

Alan Turing contribuì anche alla nascita dell'intelligenza artificiale pubblicando nel 1950 un celebre articolo intitolato: *Macchine calcolatrici e intelligenza* (1950)⁴¹. Sei anni dopo, John McCarthy (1927-2011) e Marvin Minsky (1927-2016) organizzarono il primo congresso scientifico *sull'intelligenza artificiale*, considerata come l'insieme delle conoscenze scientifiche e ingegneristiche volte alla costruzione di macchine intelligenti⁴². Lo sviluppo dell'intelligenza artificiale nei decenni successivi ha mostrato andamenti

⁴⁰ Odifreddi 2012, p. 33

⁴¹ Turing 1950.

⁴² Moor 2006.



altalenanti; i primi momenti di grande ottimismo si sono scontrati con enormi difficoltà tecniche e con diversi limiti concettuali collegati a un ambito di sviluppo conoscitivo e tecnologico così complesso⁴³.

Negli ultimi decenni l'intelligenza artificiale ha messo a punto dei sistemi in grado di apprendere in maniera automatica (*machine learning*). L'idea principale, per permettere ai computer di apprendere in maniera automatica, si riferisce alla messa a punto di algoritmi in grado di apprendere dai dati. Questi algoritmi non utilizzano regole esplicite ma identificano in maniera autonoma le relazioni esistenti tra i dati osservati⁴⁴. Le tecniche di *machine learning* si basano su tre possibili strategie: 1) l'apprendimento supervisionato, nel quale un programma viene addestrato a compiere dei compiti (ad esempio classificare delle immagini) utilizzando moltissimi esempi (migliaia di immagini); alla fine il programma (che descrive una rete neurale) è in grado di classificare le immagini usate durante l'addestramento e anche delle immagini nuove, se sbaglia viene corretto da un "insegnante"⁴⁵; 2) l'apprendimento non

⁴³ Vespignani e Rijtano 2019, pp. 58-64.

⁴⁴ Cristianini 2023, cap. 2 e 3.

⁴⁵ Per "insegnante" si intende un essere umano informato oppure un altro computer.

supervisionato (gli algoritmi devono essere in grado di scoprire da soli le strutture che collegano i dati tra di loro) e 3) l'apprendimento per rinforzo (si tratta di algoritmi che imparano per prove ed errori).

Una classe di algoritmi che negli anni recenti ha ottenuto un grande successo sono le reti neurali (*neural networks*). Si tratta di algoritmi che simulano il funzionamento delle reti nervose presenti negli organismi viventi. I più avanzati approcci di *machine learning* sono stati organizzati in ampie reti neurali disposte su molti livelli (*deep learning*). I segnali elaborati passano da un nodo all'altro utilizzando dei collegamenti simili alle sinapsi neuronali.

L'apprendimento avviene mediante una regolazione di "pesi" attraverso l'amplificazione o lo smorzamento dei segnali che transitano in ciascuna connessione. Il processo di regolazione continua fino a quando i segnali non raggiungono l'uscita. Nel caso degli apprendimenti supervisionati, se la risposta non è corretta un algoritmo di retro-propagazione ripete il processo modificando l'intensità delle connessioni in modo da ottenere un risultato migliore, e così via. Gli algoritmi basati sulle reti neurali rappresentano dei metodi molto efficaci nel riconoscimento visivo, nelle biotecnologie,

nella diagnostica medica e nell'elaborazione del linguaggio naturale (riconoscimento vocale, traduzione tra lingue, elaborazione di testi)⁴⁶.

Nello Cristianini nel suo libro *Machina Sapiens* ha proposto di distinguere nell'intelligenza artificiale generativa tre componenti. Il primo componente (esterno) si riferisce agli "agenti intelligenti" che incontriamo nel mondo (ad esempio ChatGPT). Il secondo componente (interno) si riferisce al "modello di mondo" che questo agente utilizza per prendere decisioni. Infatti, per poter scegliere quali azioni compiere il sistema deve possedere una rappresentazione del mondo. Il terzo componente è costituito dall'algoritmo in grado di generare il modello di mondo. I nuovi algoritmi di *machine learning* attualmente utilizzati si chiamano "*Trasformer*" e fanno parte di un sistema di metodi di apprendimento basato sulle "reti neurali", costituite da trilioni di "neuroni" (simulati matematicamente) tra

⁴⁶ Heaven 2019. Un modello linguistico di grandi dimensioni come GPT-4 ha evidenziato come possano emergere alcune "scintille" di intelligenza artificiale poiché è in grado di scrivere programmi in Python, tradurre da una lingua all'altra, scrivere articoli di qualità simile a quella degli esseri umani e anche di mentire (Cristianini 2024, p. 82 e p. 122).

di loro interconnessi in modo da formare una rete. All'inizio questi "neuroni" sono disorganizzati, ma durante lo svolgimento di compiti di addestramento, in maniera lenta ma progressiva si organizzano in maniera da risolvere compiti estremamente complessi.

L'intelligenza artificiale basata sui metodi di apprendimento automatico e sulle reti neurali presenta numerosi vantaggi. È in grado di identificare schemi e correlazioni che gli esseri umani non riescono a riconoscere perché troppo complessi. Inoltre, gli algoritmi sono in grado di eseguire molto velocemente compiti estremamente complessi. Tuttavia, queste forme di intelligenza artificiale presentano un problema di "trasparenza". I calcoli e i modelli che permettono di ottenere questi risultati sorprendenti restano nascosti all'interno della "scatola nera" che racchiude le dinamiche dei processi di apprendimento e non sono interpretabili all'esterno (dai ricercatori) poiché sono *estremamente* complessi⁴⁷. Si tratta di forme di "conoscenza implicita", che sono opache alla possibilità di essere comprese in maniera "esplicita" (cioè si tratta di modalità di calcolo così complesse e tortuose da risultare impenetrabili a una

⁴⁷ Manyika *et al.* 2019.

descrizione comprensibile in maniera chiara, semplice e generalizzata). Queste forme di calcolo sviluppate dai sistemi di *machine learning* assomigliano molto alle modalità di rappresentazione delle conoscenze presenti nei sistemi della memoria implicita [come ad esempio nella memoria procedurale, che sottende una vasta serie di competenze cognitivo-motorie coinvolte nel linguaggio (fonologia, morfosintassi), nella musica, negli sport e in numerose attività pratiche (deambulazione, guida di un autoveicolo)] e alle modalità di organizzazione dei pattern di attivazione elettrofisiologica presenti nei diversi sistemi funzionali del cervello umano, che sono – e credo rimarranno a lungo – incomprensibili⁴⁸.

Lo sviluppo e l'utilizzazione di sistemi di intelligenza artificiale che sono sempre più complessi, le cui modalità di funzionamento sono al di fuori della nostra comprensione sollevano molti problemi di natura filosofica e politica⁴⁹. Quanto possiamo fidarci di sistemi informatici estremamente complessi che non siamo in grado di comprendere? Questi sistemi possono diventare autoconsapevoli? Possono assumere un'autonomia

⁴⁸ Fabbro 1996; 1999; 2016; Paradis 2009.

⁴⁹ Vespignani e Rijtano 2019, pp. 66-67.

decisionale più o meno completa? Siccome sono sistemi molto efficaci nell'esecuzione di compiti (indipendentemente dalla capacità di capire come funzionano), stiamo scivolando su una china che ci porta da un livello basato sulla conoscenza scientifica a una supremazia della mera capacità di fare? A una schiacciante supremazia della tecnica sulla scienza?

L'incapacità di comprendere ciò che sta accadendo dentro questi sistemi non dipende da problemi di natura teorica (poiché tutte le operazioni all'interno del sistema sono di natura matematica) ma dall'estrema complessità del sistema (vista la grande mole delle interazioni tra gli elementi, che sono in grado di modificarsi continuamente in maniera dinamica). Secondo Nello Cristianini "è questo il vero problema posto da questa nuova tecnologia: non sappiamo che informazioni siano contenute in questi modelli, ovvero che cosa sappiano di noi e del mondo, e non abbiamo ancora un metodo perfetto per controllare il loro comportamento. Se questo non è un programma di ricerca, e urgente, non so cos'altro potrebbe esserlo"⁵⁰.

⁵⁰ Cristianini 2024, p. 73.



5. CHE COS'È L'INFORMAZIONE?

Per Norbert Wiener “l'informazione è informazione, non è né materia né energia”¹. Tuttavia, egli aderiva a una concezione filosofica di natura fisicalista e per questo motivo ha cercato di interpretare l'informazione associandola a un concetto fisico, come quello di “entropia”. A suo parere, dato che il contenuto informativo di un sistema è una misura del suo grado di organizzazione e viceversa l'entropia è una misura del suo grado di disorganizzazione, l'uno (l'informazione) è “semplicemente” l'opposto dell'altra (entropia)².

Diversi altri autori hanno ritenuto che l'informazione possa essere interpretata secondo una concezione fisicalista. Per alcuni di loro l'informazione appartiene alla categoria ontologica della “sostanza”.

¹ Wiener 1948, p. 199.

² Ivi, p. 20; come è stato accennato nel § 4.2 Wiener considera l'informazione collegandola al concetto di “ordine”; invece Shannon collega l'informazione alla entropia termodinamica.

Si tratterebbe di una entità che è in grado di fluire nei sistemi; di una entità che può essere accumulata, immagazzinata e convertita da una forma a un'altra. Per altri l'informazione è una proprietà del segnale portante³. Ad esempio, secondo Nathan Harshman l'informazione è una proprietà del sistema, reale e indipendente dall'osservatore (forse indipendente dall'esistenza di qualsiasi osservatore)⁴. Per Rolf Landauer l'"informazione è fisica", e per questo non deve essere considerata come una entità astratta o un'entità disincarnata⁵. Per Peter Kosso dato che l'informazione può essere trasferita, significa che il segnale portante assume un ruolo decisivo⁶.

Altri fisici e filosofi hanno proposto delle riflessioni più caute e maggiormente orientate verso delle concezioni critiche del concetto di informazione. L'informazione è stata collegata alla dimensione del linguaggio e della "conoscenza", secondo questa prospettiva ricevere informazioni significa aumentare la conoscenza⁷. Ad

³ Lombardi e Lopez 2021, p. 331.

⁴ Harshman 2016, p. 7.

⁵ Landauer 1991.

⁶ Kosso 1989, p. 37.

⁷ Dretske 1981, p. 47; Zeilinger 1999, p. 633; Adriaans e van Benthem 2008, p. 15.

Che cos'è l'informazione?

esempio, il fisico statunitense Hans von Baeyer, nel suo libro *Informazione. Il nuovo linguaggio della scienza* (2003), ha sostenuto che non sappiamo realmente che cosa sia l'informazione (come pure non sappiamo realmente che cosa sia l'energia). A suo parere: "L'energia è circoscritta in un sistema fisico [...]. Le informazioni, invece, risiedono parzialmente nella mente"⁸. E a proposito della famosa frase pronunciata nel 1989 dal fisico statunitense John Archibald Wheeler (1911-2008): "It from bit", von Baeyer – in accordo con questa prospettiva – ritiene che: "La conoscenza del mondo è costituita da informazioni; e dal momento che le informazioni sono quantizzate in bit, anche il mondo appare quantizzato. Se non lo fosse, non saremmo in grado di comprenderlo"⁹. Tuttavia, il fatto che il mondo appaia quantizzato non significa che lo sia. La discretizzazione (quantizzazione) è una forma di rappresentazione del mondo utile per il controllo e la previsione¹⁰.

Per Hans von Baeyer, come per il grande fisico teorico Niels Bohr (1885-1962), la

⁸ von Baeyer 2003, p. 25.

⁹ *Ibid.*

¹⁰ Comunicazione personale di Elio Toppano.

fisica (in generale) e la meccanica quantistica, non descrivono il mondo in sé, “ma solo quello che siamo in grado di *dire* su di esso”¹¹. Nelle nostre interazioni con il mondo le informazioni assumono il ruolo di intermediario. Secondo questa prospettiva noi non vediamo e non misuriamo un atomo, ma raccogliamo informazioni sull’atomo, informazioni che ci permettono di fare previsioni sulle informazioni che potremmo raccogliere in futuro. “Se accettiamo il fatto che le informazioni, non la materia, siano l’essenza della meccanica quantistica, il riduzionismo, quel servo fedele e imperfetto della scienza, ci obbliga a chiedere: quali sono i mattoni con cui sono costruite le informazioni? Zeilinger risponde: le proposizioni¹²; Wheeler li chiama risposte alle domande¹³; la più semplice è una domanda con risposta equiprobabile sì-o-no con una risposta che misura 1 “bit” di informazione”¹⁴.

¹¹ von Baeyer 2003, p. 269.

¹² Anton Zeilinger, premio Nobel per la fisica, esperto di teletrasporto quantistico e famoso anche per le grandi doti di divulgatore scientifico, cfr. Zeilinger 2003; 2009.

¹³ Wheeler 1989.

¹⁴ von Baeyer 2003, p. 269.

Che cos'è l'informazione?

5.1 Gregory Bateson e il concetto di informazione

Insieme a Giuseppe O. Longo – docente emerito di Teoria dell'Informazione all'Università di Trieste – ritengo che lo studio del libro *Verso un'ecologia della mente* (1972) di Gregory Bateson (1904-1980) rimanga ancora oggi una pietra miliare nella riflessione filosofica sul concetto di informazione¹⁵. In questo libro l'autore sostiene che le idee sull'origine dell'universo – sviluppate all'interno della tradizione giudaico-cristiana – si sono concentrate su due aspetti generali: l'origine della materia e l'origine dell'ordine. Il libro della Genesi liquida il tema dell'"origine della materia" in maniera piuttosto sbrigativa con la frase: "Nel principio Iddio creò il cielo e la terra" (*Genesi* 1, 1). Invece, molta più attenzione è stata dedicata al tema dell'origine dell'"ordine". "E Iddio separò la luce dalle tenebre. [...] E Iddio separò le acque che son disotto alla distesa (cielo) da quelle che sono disopra d'essa" (*Genesi* 1, 4-6).

In questo testo antico l'ordine è collegato all'attività di "separare", alla "divisione" e alla "distribuzione". Si tratta di

¹⁵ Il libro è stato tradotto in italiano nel 1976 da Giuseppe O. Longo.

caratteristiche collegate alla nozione di “differenza”. Se desideriamo separare un mucchio di palline di due colori (bianche e nere), mettendo le palline bianche in un contenitore e quelle nere in un altro, dobbiamo essere in grado di riconoscere la differenza di colore tra le palline. Per cogliere questa differenza è necessario avere a disposizione degli “organi di senso” (in questo caso la vista). Secondo Bateson, per creare ordine, cioè per creare qualcosa di improbabile, è necessario invocare l’esistenza di un essere vivente: un organismo senziente (oppure una macchina costruita da esseri senzienti).

In un universo dove non esistono “organismi”, dotati di “recettori sensoriali” (sensibili agli stimoli fisici e/o chimici), o dove non esistano macchine costruiti da esseri senzienti, non è data alcuna differenza. Si tratta di una considerazione già avanzata da Friedrich Nietzsche (1844-1900), secondo il quale: “Non c’è nessun avvenimento in sé. Ciò che accade è un gruppo di avvenimenti, *trascelti* e riassunti da un essere interpretante. [...] Una cosa è uguale alle sue proprietà; queste sono a loro volta uguali a tutto ciò che nella cosa *ci interessa*: un’unità in cui sintetizziamo le relazioni *che vengono* per noi *in considerazione*. In

Che cos'è l'informazione?

fondo stanno le modificazioni *percepite* in noi [...]. *In summa*: un oggetto è la somma degli ostacoli sperimentati di cui siamo divenuti consapevoli”¹⁶.

Nel capitolo intitolato: *Forma, sostanza e differenza*, del libro citato, Bateson si interroga su *che cosa sia una differenza*? Egli sostiene che una differenza è qualcosa di astratto. Di non pertinente al mondo oggetto di studio della Fisica, un mondo che egli definisce newtoniano, dove sono presenti soltanto “forze, urti e scambi di energia”¹⁷. La “differenza” è un concetto che appartiene al mondo della comunicazione¹⁸. Ma la comunicazione è possibile soltanto se si ammette l'esistenza di entità funzionalmente separate, cioè di organismi viventi (che comunicano tra di loro e al loro interno), o di macchine create da esseri senzienti. Infatti, soltanto gli organismi viventi (o macchine) sono in grado di generare una “rappresentazione” dell'ambiente (e di loro stessi).

¹⁶ Nietzsche 1885-1887, vol. VIII, fr. 1 [115] autunno 1885-primavera 1886; fr. 2 [77] autunno 1885-autunno 1886.

¹⁷ Bateson 1972, p. 469.

¹⁸ Ivi, p. 468-469.

5.2 Organismi viventi e informazione

Gli organismi viventi ogni istante della loro esistenza sono sottoposti alla necessità di compiere delle scelte, per questa ragione sono dotati di opportuni “sistemi di valutazione”. Per ogni decisione debbono considerare il valore e il costo delle loro scelte. Per essi scegliere non è facoltativo, per riuscire a sopravvivere e a riprodursi debbono compiere delle “scelte informate”¹⁹. Questo discorso non vale soltanto per gli organismi più complessi, ma anche per quelli più semplici; come ad esempio per l'*Escherichia coli*, uno dei batteri più semplici presenti sulla Terra, un organismo molto simile al primo essere vivente: il *Last Universal Common Ancestor* (LUCA), da cui sono originati tutti gli altri esseri viventi (batteri, funghi, piante e animali)²⁰.

Come tutti gli esseri viventi anche l'*Escherichia coli* ha bisogno di nutrirsi (di ricavare alimenti e energia dall'ambiente). Uno dei suoi alimenti preferiti è l'aminoacido aspartato. Per questo motivo, il batterio *Escherichia coli* è provvisto di “rilevatori” della concentrazione di aspartato che gli

¹⁹ Montague 2006, pp. 2-3.

²⁰ de Duve 2005, cap. 13.

Che cos'è l'informazione?

permettono di orientarsi verso la direzione dell'ambiente in cui le concentrazioni di questo aminoacido sono più alte. Attraverso questi rilevatori *E. coli* è in grado di costruire una "rappresentazione" delle concentrazioni dell'aminoacido nell'ambiente, ossia un "modello dell'aspartato nel mondo". "Senza neuroni, l'*Escherichia coli* costruisce una propria visione del mondo di aspartato impiegando reti di segnalazione biochimica interna. Di fatto, il batterio *Escherichia coli* è dotato sin dalla nascita della capacità di costruire tali modelli del mondo"²¹.

Per riuscire a costruire dei modelli del mondo l'*Escherichia coli* deve suddividere l'energia ottenuta dalle sostanze nutritive in due flussi distinti: uno per sostenere il *metabolismo* e l'altro per elaborare delle *informazioni* (flusso di modellazione). I sistemi di valutazione permettono agli organismi di investire energia sulla gestione dei flussi di informazione che permettono di elaborare dei modelli del mondo. Si tratta di processi che consumano energia nel *presente* al fine di costruire modelli che si riguardano il *futuro* (incerto). Ciò significa che tutti gli organismi viventi possiedono scopi e devono

²¹ Montague 2006, p. 123.

“preoccuparsi” di qualcosa, in caso contrario, infatti “non avrebbero alcun criterio per orientare il loro comportamento”²².

La presenza di organismi viventi, dotati di sistemi di valutazione (basati sulla presenza di recettori sensoriali) genera una dicotomia fondamentale tra il “territorio” e la rappresentazione dello stesso, nel modello o “mappa”. Il “territorio” è costituito dall’universo materiale (studiato dalla fisica, dalla chimica, dalla cosmologia, eccetera), nel quale sono situati anche gli organismi viventi. La “mappa” è costituita dalle rappresentazioni elaborate da un organismo vivente (o da una macchina costruita da esseri senzienti). Le mappe sono dalle “immagini” del territorio simili a quelle elaborate dai sistemi di navigazione satellitare, o nelle “carte geografiche” di un tempo. Nel suo libro *Verso un’ecologia della mente* Bateson si chiede: quali parti del territorio vengono rappresentate sulla mappa? A suo parere, se il territorio fosse completamente uniforme, cioè senza valli, fiumi, colline, montagne, strade, edifici, eccetera, la mappa non riporterebbe nulla. Ciò che viene trasferito su di una mappa sono le “differenze” di quota, di vegeta-

²² Ivi, p. 125.



Che cos'è l'informazione?

zione, di superficie. “Le differenze sono le cose che vengono riportate su di una mappa”²³.

5.3 I concetti di “mappa” e di “territorio”

Come è stato detto, le differenze sono “entità astratte” che appartengono al mondo della comunicazione, un mondo generato da organismi viventi. Un oggetto del mondo newtoniano, come un pezzo di gesso, un sasso o una sedia, presenta per ogni loro atomo o per ogni molecola un numero infinito di differenze (che riguarda la posizione in cui essi si possono trovare), tra queste infinite possibilità un organismo vivente ne sceglie un numero limitato; queste differenze che l'organismo rileva diventano “informazione”. “Ciò che intendiamo per informazione (per unità elementare di informazione) è una differenza che produce una differenza”²⁴.

Qualche decennio dopo, Giuseppe O. Longo ha proposto di considerare come “informazione”: “Una differenza che genera

²³ Bateson 1972, p. 468.

²⁴ Ivi, p. 470; Bynum 2016, p. 206.



una differenza *per qualcuno*²⁵. Secondo la prospettiva delineata da Bateson, e ancora prima di lui da Norbert Wiener, la “teoria dell’informazione” deve essere considerata come una disciplina collegata alla “cibernetica” ed entrambe appartengono alle “scienze della comunicazione”. Poiché secondo Immanuel Kant l’atto estetico più elementare è costituito dalla scelta di un fatto²⁶, o dalla identificazione di una differenza che fa la differenza (per qualcuno), ne risulta – come ha sostenuto a metà degli anni Cinquanta il filosofo francese Gilbert Simondon (1924-1989) – che le discipline collegate all’informazione (e in particolare la cibernetica) dovrebbero essere situate come una sezione nella *Critica del Giudizio* di Kant²⁷.

Ma che cos’è il “territorio”? Bateson sostiene che il territorio è ciò che viene rappresentato su di una mappa. Una cartina geografica (una mappa) riprende la rappresentazione retinica di un geografo²⁸. A sua

²⁵ Longo 1998, p. 33; Longo e Vaccaro 2013; Demozzi 2012, pp. 4-5; una prospettiva simile era stata precedentemente avanzata da von Foerster 1980, 1984.

²⁶ Kant 1790, *Critica del Giudizio. Introduzione*, VIII.

²⁷ Simondon 1953, p. 16; cfr. anche Simondon 1958.

²⁸ “Nella scienza le cose devono essere misurate e pesate. Ma le relazioni non possono esserlo; le relazioni devono essere mappate. [...] Mappare le relazioni e studiare i pattern non è un approccio quantitativo ma qua-

Che cos'è l'informazione?

volta, la rappresentazione retinica viene ripresa (e ripetuta) in una serie di mappe che si succedono nelle diverse strutture cerebrali [nel tronco dell'encefalo (mesencefalo), nelle diverse aree corticali responsabili della elaborazione visiva (aree visive occipitali, temporali, parietali e frontali) e così via]. Si tratta di una serie innumerevole di mappe, nelle quali il territorio non entra mai in scena. Il territorio è – secondo Bateson – la “cosa in sé” (*Ding an sich*), il noumeno di Kant. I procedimenti di rappresentazione che caratterizzano l'attività mentale (la psiche) lo elimineranno sempre. Il mondo mentale, cioè il mondo della elaborazione delle informazioni, è costituito soltanto “da mappe di mappe, *ad infinitum*. Tutti i fenomeni sono letteralmente delle apparenze”²⁹.

Nella sua dimensione ontologica, l'informazione come “differenza che genera una differenza per qualcuno” non appartiene al mondo fisico dove sono presenti soltanto eventi causati da forze, urti, masse e scambi di energia; mondo nel quale – come è stato detto – non è presente alcuna “distinzione”

litativo. Nel pensiero sistemico è implicito un passaggio dalle quantità alle qualità, che è stato particolarmente evidente nel recente sviluppo della teoria della complessità” (Capra e Luisi 2014, pp. 108-109).

²⁹ Bateson 1972, p. 472.

(cioè non è presente alcuna differenza che abbia significato per qualcuno). Bateson ha proposto di chiamare questo mondo “Pleroma”³⁰, mentre Simondon parlava del mondo delle “strutture”³¹. Con la comparsa dei primi organismi viventi al Pleroma si è aggiunto il mondo della “Creatura”, cioè il mondo delle informazioni e della comunicazione (Simondon parlava del mondo delle “operazioni”). Poiché non può darsi alcun “messaggio” senza un substrato materiale (Pleroma) deve esistere un lato fisico (chimico, fisiologico) per ogni informazione. L’interpretazione del concetto di informazione proposta da Bateson permette di comprendere due tipi di errori piuttosto comuni. Il primo consiste nel considerare esistente soltanto la componente materiale delle informazioni (come tendono a fare numerosi fisici e fisiologi)³², il secondo a omettere il contesto nel quale l’informazione si genera ed è inserita (ossia l’ambito degli organismi viventi e in particolare la dimensione cognitiva e linguistica che ha permesso agli esseri umani di sviluppare le scienze e la filosofia).

³⁰ Bateson ha ripreso i concetti di Pleroma e Creatura dal pensiero gnostico attraverso un testo di Carl Gustav Jung intitolato *Septem Sermones ad mortuos* (Jung 1916).

³¹ Simondon 1953, pp. 17-18.

³² Fabbro 2016; 2021a; 2021b; 2023.

Che cos'è l'informazione?

5.4 Caratteristiche dell'informazione biologica

Le argomentazioni di Gregory Bateson, e le riflessioni del suo traduttore italiano Giuseppe O. Longo, indicano con chiarezza che l'informazione è una entità “non materiale”, che tuttavia necessita sempre di un supporto fisico per manifestarsi, ma che per questa sua natura immateriale si pone a un livello differente del mondo fisico. L'informazione non è dunque un'entità materiale ma nemmeno una entità soprannaturale. Un dato indicativo, tra i tanti, che ci permette di sostenere che l'informazione si pone a un livello differente dal mondo fisico riguarda l'unità di misura scelta da Claude Shannon per rappresentarla.

Il *Binary Digit* (bit) (cfr. § 4.2) che costituisce l'unità di misura dell'informazione non appartiene a nessuna delle unità stabilite per il “mondo fisico” dal Sistema Internazionale delle unità di misura (*Système international d'unités*). Le sette dimensioni del Sistema Internazionale delle Grandezze fisiche (ISO/EIC 8000 del 2009) prevedono sette unità di misura fondamentali: 1) l'intervallo di tempo (secondo), 2) la lunghezza (metro), 3) la massa (chilogrammo), 4) l'intensità di corrente (ampere), 5) la temperatura (Kelvin), 6) l'intensità luminosa (candela) e 7) la quantità di sostanza (moli). Tutte le altre

unità di misura pertinenti al mondo fisico si ricavano da queste sette³³. Si può facilmente comprendere che i “bit” non appartengono né derivano da nessuna delle unità fondamentali del mondo fisico.

Nel suo livello più fondamentale l'informazione biologica si riferisce prima di tutto al DNA. Oltre a questo livello dell'informazione genetica sono presenti molti altri livelli, come ad esempio quello della regolazione delle cellule; il livello degli organi e degli apparati; il livello che studia la struttura e le funzioni del sistema nervoso; la psiche, le strutture sociali e il linguaggio. Ebbene, sia per il DNA (che costituisce l'ambito più fondamentale e più profondo della biologia), sia per il linguaggio (che può essere considerato come il sistema informazionale più generale e più superficiale) l'informazione non è collegata con la struttura materiale del messaggio (nucleotidi, fonemi, lettere dell'alfabeto, eccetera) ma piuttosto con l'ordine delle “sequenze” con cui compaiono gli elementi materiali che compongono il messaggio. Ciò significa che l'ordine (la sequenza) è più importante degli elementi materiali. A conferma di tale fatto, è possibile constatare che la stessa informazione può essere contenuta in supporti differenti.

³³ www.inrim.it/it/ricerca/campioni-primari.

6. L'INFORMAZIONE A LIVELLO DEL DNA

Il DNA (acido deossiribonucleico) e l'RNA (acido ribonucleico) costituiscono l'esempio più chiaro e probabilmente più antico di registrazione delle informazioni¹. La scoperta della struttura del DNA, avvenuta nel 1953 a opera di James Watson e Francis Crick, ha rappresentato il contributo più significativo per la comprensione del così detto "segreto della vita"². Tutti gli organismi viventi possiedono un polimero di DNA (o di RNA), esso costituisce la sorgente di informazioni necessarie per sopravvivere e riprodursi. Infatti, il DNA e l'RNA sono dei polimeri organici essenziali per costruire le proteine, le quali sono a loro volta gli elementi fondamentali per il funzionamento delle cellule³.

¹ Collier 2008, p. 776; Maynard Smith e Szathmari 1995, p. 6.

² Watson e Crick 1953; Watson 1968; Crick 1988.

³ Nurse 2020, p. 121

Le “proteine” sono dei polimeri costituiti da catene (collane) di aminoacidi legati tra di loro. L'ordine con cui i singoli aminoacidi vengono legati uno vicino all'altro è stabilito dal DNA. Le proteine costituiscono gli elementi funzionali più importanti di una cellula vivente. Esse facilitano le reazioni chimiche (*enzimi*), regolano grande parte del traffico in entrata e in uscita di sostanze dalla cellula (*canali* e *pompe*), fungono da *recettori* di segnali o di neurotrasmettitori, partecipano alla costituzione di complessi dispositivi cellulari (ribosomi), svolgono ruoli strutturali (fibre elastiche), oppure possono agire come ormoni o anticorpi.

6.1 *La struttura del DNA*

Il DNA è costituito da una struttura a doppia elica formata da due lunghe catene composte da quattro tipi di nucleotidi. Negli esseri umani il filamento di DNA è lungo circa un metro ed è presente in quasi tutte le cellule dell'organismo (nei batteri i filamenti di DNA sono molto più corti). I quattro nucleotidi che compongono il DNA sono: l'*adenina* (A), la *citosina* (C), la *guanina* (G) e la *timina* (T). La struttura a doppia elica

rende la macromolecola del DNA molto resistente (poiché i nucleotidi delle due catene formano dei legami chimici tra adenina e tiamina e tra guanina e citosina).

L'informazione contenuta nel DNA è codificata nella "sequenza" (ordine) che i quattro nucleotidi assumono nel filamento di DNA. Ciò che differenzia a livello genetico un essere umano da un altro è, dunque, la sequenza di questi quattro nucleotidi. Ciascuno di noi ha una sequenza differente dalle altre persone (anche se circa il 99% della sequenza del DNA è uguale per tutti gli esseri umani). I quattro nucleotidi possono essere considerati come delle "lettere" (A, C, G, T) che combinandosi tra di loro sono in grado di realizzare un "messaggio". L'ordine di questi quattro nucleotidi è indipendente dalla massa e dall'energia che li compongono, per questa ragione la "materia" su cui è costruita l'informazione genetica dipende dalla dimensione fisico-chimica, ma la "sequenza" dei nucleotidi è qualcosa che va al di là della struttura fisica, essa dipende dalla storia evolutiva di una particolare specie vivente, rappresentata da uno specifico individuo.

Il DNA degli esseri umani è composto da 3,2 miliardi di nucleotidi (per ciascun fi-

lamento). Se traduciamo i quattro nucleotidi in codice binario (A = 00; T = 01; C = 10; G = 11) otteniamo l'estensione dell'informazione presente nel DNA umano, circa sei miliardi di bit d'informazione (meno di un gigabyte)⁴. Soltanto una parte del DNA contiene le informazioni per costruire le proteine. La mappatura dell'intero genoma umano ha evidenziato la presenza di circa 20.000 “geni”, ciascuno in grado di codificare una proteina; insieme ad altrettanti geni non codificanti (che intervengono nei processi di regolazione e nella codificazione di diversi tipi di RNA funzionali)⁵. Gli organismi viventi più semplici, i batteri, presentano un DNA molto più breve, ad esempio l'*Escherichia coli* ha un filamento di DNA composto da circa 4,6 milioni di nucleotidi, che codificano per circa 4500 proteine differenti.

6.2 Il codice genetico

Il DNA contiene la maggior parte delle informazioni necessarie per costruire un organismo vivente. Se conosciamo l'ordine

⁴ Parthasarathy 2022, p. 30.

⁵ Alberts *et al.* 2014, p. 314; Parthasarathy 2022, cap. 4.

della sequenza delle quattro lettere (nucleotidi) del DNA siamo in grado – almeno a livello teorico – di costruire un intero organismo. Negli organismi multicellulari come gli esseri umani, ogni cellula contiene il DNA per costruire l'intero organismo (nelle cellule dei vari tessuti, come il fegato, il pancreas, il cervello, la parte del DNA che non è funzionale a quello specifico tessuto viene repressa)⁶.

Il processo di sintesi delle proteine avviene in due fasi: 1) la “trascrizione” del DNA in RNA messaggero (processo che nelle cellule eucariote avviene nel nucleo); 2) la “traduzione” dell'RNA nella struttura primaria delle proteine (una volta prodotte all'interno della cellula le proteine assumono una complessa struttura tridimensionale che è responsabile della loro funzione)⁷. La prima fase consiste nella copiatura del

⁶ Nurse 2020.

⁷ La quantità d'informazione contenuta nella struttura tridimensionale delle proteine (terziaria o quaternaria) è molto più grande dell'informazione contenuta nella struttura primaria. Per un polipeptide di 100 amminoacidi Jaques Monod stima che l'informazione necessaria a definire la sequenza corrisponde a circa 2000 bit, mentre per definire la struttura tridimensionale bisogna aggiungere una maggiore quantità d'informazione difficilmente misurabile (almeno altri 2000 bit); cfr. Monod 1972, p. 82.

DNA in una seconda sequenza di nucleotidi chiamata acido ribonucleico (RNA). Questo acido è formato da un unico filamento composto da sequenze di tre nucleotidi presenti nel DNA (adenina, guanina e citosina), mentre la timina è sostituita nell'RNA dall'uracile.

La trascrizione dal DNA al RNA viene effettuata da uno specifico enzima: RNA polimerasi. Questo enzima riconosce l'inizio di un gene da trascrivere (regione detta *promotore*) e la fine dello stesso (*segnale di terminazione*). Gli RNA messaggeri (mRNA) dopo essere stati prodotti vengono portati a maturazione attraverso dei complessi processi di taglia e cuci. A questo punto gli mRNA maturi vengono trasportati fuori dal nucleo. Nel citoplasma le molecole di mRNA forniscono lo stampo per la costruzione delle proteine. Per realizzare questo fondamentale processo operano diverse altre unità costituite: da un diverso tipo di RNA transfert (tRNA), da alcuni tipi di proteine e dai ribosomi.

Poiché l'mRNA è costituito soltanto da quattro nucleotidi (A, G, C, U) mentre gli amminoacidi che compongono tutte le proteine degli organismi sono venti (diciannove dei quali sono levogiri), la decodificazione dell'RNA messaggero non può

avvenire facendo corrispondere a un nucleotide un amminoacido. Nel 1961 sono state scoperte le regole che permettono di tradurre una sequenza di nucleotidi in una sequenza di amminoacidi⁸; tali regole sono note come *codice genetico* (tabella 6.1) e sono, nella loro architettura, simili alle regole di codificazione delle lettere dell'alfabeto nel codice Morse o nel codice ASCII (tab. 4.1 e 4.3).

Si è scoperto che sequenze di tre nucleotidi (chiamati codone) codificano per un amminoacido. Dato che i nucleotidi utilizzati nel DNA (e nell'RNA) sono quattro, non è possibile costruire un codice genetico formato da un nucleotide e nemmeno da combinazioni di due nucleotidi ($4^2 = 16$ possibilità, a fronte di 20 aminoacidi) è necessario utilizzare combinazioni di tre nucleotidi (triplette), con sequenze di tre nucleotidi: le possibilità sono 4^3 cioè 64. Ne risulta che quasi tutti gli amminoacidi (a esclusione del triptofano e della metionina) sono codificati da più di una tripletta di nucleotidi. Inoltre, alcune triplette segnalano l'inizio (AUG) e la fine (UAA, UAG, UGA). È importante sottolineare che il codice genetico è universale, ossia è

⁸ Crick 1988, p. 134.

lo stesso in tutti gli organismi presenti sulla Terra. Ciò significa che tutti gli organismi attuali derivano da un unico organismo unicellulare ancestrale.

Alcuni biologi e genetisti sono stati attratti dalle coincidenze a livello strutturale e simbolico tra il DNA e il linguaggio. Anche all'interno del DNA è possibile identificare delle unità, i singoli nucleotidi che non sono dotati di significato; essi corrispondono ai fonemi del linguaggio (lettere dell'alfabeto). Altre unità sono dotate di significato, come i "codoni" che possono essere posti in relazione con le "parole"; invece, i "geni" possono essere posti in relazione con le frasi o con i discorsi del linguaggio. Quindi sia i "codoni" del DNA (triplette di nucleotidi che codificano per un amminoacido) sia le "parole" del linguaggio sono composti da elementi che non rimandano ad alcun significato, come i fonemi (/a/, /p/, /t/, ecc.) e i nucleotidi (A, T, G, G)⁹.

Il codice genetico è un sistema simbolico e combinatorio come l'alfabeto. Si parla di "simboli" sia nel caso delle lettere dell'alfabeto, sia nel caso del DNA poiché "qualcosa (un suono del linguaggio, un

⁹ Jacob 1970, pp. 320-235; Nurse 2020, p. 27.

codone) sta per qualcos'altro (una lettera dell'alfabeto, un amminoacido)"¹⁰. Inoltre, sia nel caso dei suoni del linguaggio, sia nel caso dei codoni, il rapporto tra il suono e la lettera dell'alfabeto, la tripletta di nucleotidi (codone) e l'aminoacido sono in larga parte arbitrari, cioè dovuti al caso¹¹. Alla stessa stregua, la stringa di fonemi per rappresentare il concetto di "cane" in inglese è "dog", mentre la tripletta dei nucleotidi (del RNA) UUG seleziona l'aminoacido triptofano. L'arbitrarietà in questo caso è rappresentata dal fatto che nelle lingue diverse dall'inglese si usano altre stringhe di fonemi per verbalizzare il concetto di cane; in maniera simile è possibile immaginare altri codici genetici (presenti su altri pianeti) nei quali viene utilizzata una differente tripletta di nucleotidi per selezionare l'aminoacido triptofano.

¹⁰ Longo 1998, p. 32; Deacon 2012.

¹¹ Biro 2011; Bucci 2024, pp. 86-93.

Filosofia dell'informazione biologica

Codoni dell'RNA	Aminoacido
UUU, UUC	fenilalanina
UCU, UCC, UCA, UCG, AGU, AGG	serina
UUA, UUG, CUU, CUC, CUA, CUG	leucina
UAU, UAC	tirosina
UGU, UGC	cisteina
UGG	triptofano
CCU, CCC, CCA, CCG	prolina
CAU, CAC	istidina
CAA, CAG	glutammina
CGU, CGC, CGA, AGA, AGG	arginina
AUU, AUC, AUG	isoleucina
ACU, ACC, ACA, ACG	treonina
AAU, AAC	asparagina
AAA, AAG	lisina
AUG	metionina
GUU, GUC, GUA, GUG	valina
GCU, GCC, GCA, GCG	alanina
GAU, GAC	acido aspartico
GAA, GAG	acido glutammico
GGU, CGC, GGA, GGG	glicina
AUG	INIZIO
UAA, UAG, UGA	TERMINE

Tabella 6.1. Il codice genetico, specifiche triplette di nucleotidi (codoni) codificano per un amminoacido

6.3 I processi di regolazione cellulare

I processi di regolazione a livello genetico, cellulare e di alcuni strategici sistemi presenti nell'organismo (sistema immunitario, sistema ormonale) rivestono una importanza straordinaria in biologia. Essi rappresentano un fecondo ambito di studi della teoria dell'informazione biologica poiché è possibile identificare con sufficiente chiarezza le sorgenti di informazioni, i messaggi, i recettori e i numerosi sistemi di regolazione a feedback. Il primo sistema di regolazione a livello genetico è stato identificato nel batterio *Escherichia coli* da François Jacob e Jaques Monod (1910-1976), che per questa scoperta hanno ricevuto il premio Nobel per la fisiologia e la medicina nel 1965. Questo batterio è in grado di metabolizzare numerosi alimenti, tra cui il lattosio (uno zucchero presente nel latte)¹².

Per metabolizzare questo zucchero *Escherichia coli* utilizza tre enzimi, uno di questi è costituito da una pompa per introdurre il lattosio all'interno della cellula. Quando è presente lattosio nell'ambiente, questo zucchero si lega a un recettore specifico del lattosio che si trova sulla membrana

¹² Parthasarathy 2022, pp. 72-77.

cellulare del batterio, dopodiché il lattosio viene introdotto all'interno della cellula. La presenza di lattosio all'interno della cellula determina la disattivazione di una proteina (chiamata *repressore lac*) che blocca la sintesi degli enzimi coinvolti nel metabolismo di questo zucchero. La disattivazione del *repressore lac* permette all'RNA polimerasi di trascrivere i geni responsabili della sintesi degli enzimi (proteine) coinvolti nel trasporto e nel metabolismo del lattosio. Una volta terminato il lattosio (nell'ambiente esterno al batterio e al suo interno), si attiva di nuovo il *repressore lac*, il quale inibisce la sintesi degli enzimi coinvolti nel metabolismo di questo specifico zucchero.

Esistono cicli analoghi di regolazione per quasi tutte le proteine prodotte dagli organismi viventi. Essi costituiscono la "logica informatica" presente nelle cellule degli organismi viventi¹³. Lo studio di questi cicli di feedback costituisce la biologia dei sistemi. È all'interno di questi complessi cicli di retroazione che possono emergere nuove proprietà, come ad esempio la presenza di feedback auto-attivanti, coinvolti nella produzione persistente di proteine o nei processi biologici che permettono la formazione della memoria.

¹³ Hoffmann 2012, pp. 286-289.

6.4 Le principali transizioni nell'evoluzione

Alla fine dello scorso secolo il genetista John Maynard Smith (1920-2004) e il biologo evoluzionista Eörs Szathmáry hanno pubblicato un libro intitolato *The Major Transitions in Evolution* (1995)¹⁴. In questo saggio i due autori hanno proposto che l'evoluzione dei viventi si sia articolata in otto principali transizioni. Le prime due transizioni hanno riguardato l'origine di molecole replicanti (in ambienti delimitati); la terza transizione ha riguardato l'origine del DNA, del codice genetico e dei processi di traduzione dal DNA alle proteine. La quarta transizione ha riguardato l'evoluzione di organismi eucarioti (cellule dotate di nucleo). La quinta transizione ha riguardato l'origine della riproduzione sessuale; la sesta transizione si è riferita alla comparsa di organismi pluricellulari (animali, piante e funghi). La settima transizione ha riguardato il passaggio da individui isolati a colonie animali; infine, l'ottava transizione ha riguardato lo sviluppo delle società umane.

Secondo Maynard Smith e Szathmáry la più complessa ed enigmatica di queste transizioni è la terza, quella che ha riguardato lo

¹⁴ Maynard Smith e Szathmáry 1995.

sviluppo del sistema di immagazzinamento delle informazioni nel DNA e delle successive modalità di traduzione di queste informazioni, attraverso la trascrizione nell'RNA e la sua traduzione (attraverso il codice genetico) nei processi di costruzione delle proteine. Diversi autori si sono interrogati sul perché dell'esistenza di una modalità così complessa di immagazzinamento, trascrizione e traduzione delle informazioni¹⁵. Uno dei vantaggi evolutivi che questi complessi processi garantiscono si riferisce alla riduzione di ambiguità e l'alta fedeltà realizzata da questo sistema di sintesi delle proteine¹⁶. Alcuni autori hanno sostenuto che questa transizione si è probabilmente verificata a partire da un "mondo a RNA"; una condizione originaria dove i filamenti di acido ribonucleico rivestivano molteplici compiti come il deposito di informazione (capaci di duplicazione) e anche come enzimi che intervengono nella facilitazione di alcune reazioni chimiche¹⁷.

La complessità dei processi di memorizzazione (DNA), trascrizione (RNA) e traduzione delle informazioni (proteine) è dovuta

¹⁵ Ivi, cap. 6; Bratman 2021, cap. 9.

¹⁶ Collier 2008, pp. 786-787.

¹⁷ Woese 1967; Crick 1981; Orgel 2002; Ball 2025.

alla necessità di avere a che fare con “due mondi indipendenti” (il mondo del DNA e quello delle proteine)¹⁸; una caratteristica che secondo il matematico di origine ungherese John von Neumann è necessaria per riuscire a costruire delle macchine (automi) o degli organismi in grado di replicare sé stessi (autoriprodursi). Secondo von Neumann gli organismi (o gli automi) per riprodursi devono possedere un “progetto” che deve essere differente rispetto alla “struttura” dell’organismo stesso, cioè il progetto e l’organismo dovevano appartenere a due mondi separati¹⁹. Inoltre, secondo von Neumann la riproduzione non deve mirare a riprodurre delle copie perfettamente uguali all’originale, ma devono essere previste delle piccole variazioni tra le varie copie; variazioni che si realizzano negli organismi grazie ad alcuni errori di copiatura del DNA chiamati *mutazioni*. Gli effetti delle mutazioni possono essere neutri (quando la modifica di un codone non cambia l’aminoacido selezionato), oppure negativi (quando producono gravi errori nel funzionamento della cellula), mentre in qualche caso tali errori possono risultare positivi, possono cioè fornire un vantaggio evolutivo.

¹⁸ Barbieri 2002; Collier 2008, p. 787.

¹⁹ von Neuman 1951; 1966.

Poiché l'origine della vita appare essere strettamente collegata con l'origine dell'informazione biologica²⁰, ognuna delle transizioni descritte da Maynard Smith e Szathmáry rappresenta una modalità di generazione e amplificazione delle informazioni²¹. Accanto a queste otto transizioni si possono aggiungere – a mio parere – altre due transizioni molto importanti. La prima di queste ulteriori transizioni è collegata con la comparsa di organismi pluricellulari e riguarda lo sviluppo di animali (vertebrati, insetti, molluschi) dotati di sistemi nervosi sufficientemente complessi, tali da permettere lo sviluppo di modelli mentali, che hanno permesso l'apprendimento (memoria) e la generazione di simulazioni (modelli predittivi del mondo). La seconda ulteriore transizione, capitata soltanto negli esseri umani, è la sistematica invenzione e utilizzazione di strumenti tecnologici, tra cui il più impressionante è stato senz'altro il linguaggio. Una caratteristica della tecnologia si riferisce alla sua proiezione nel futuro. Soltanto pensando al possibile uso nel futuro si costruiscono e si conservano strumenti. Anche il linguaggio – come tecnologia di condivisione dei prodotti immaginativi della mente

²⁰ Davies 2000; Moffatt 2016.

²¹ Atlan 2007; Godfrey-Smith e Kim 2016.



L'informazione a livello del DNA

– è decisamente collegato al tempo. Grazie al linguaggio gli esseri umani sono in grado di concepire, riflettere e indirizzare la loro vita alla luce del fatto che sono mortali.

6.5 L'origine biologica dell'informazione

Gli studiosi di fisica e di cosmologia sono riusciti a sviluppare una teoria sull'origine dell'universo. Esso è comparso più di 13 miliardi di anni fa. Alla stessa stregua è possibile chiedersi quando sia comparsa l'informazione? Una "entità" che dipende dal mondo fisico ma che non è materiale (non è né materia, né energia). È probabile che sulla Terra l'informazione sia comparsa quando si sono manifestati i primi processi di copiatura dell'RNA e/o del DNA, ossia più di 4 miliardi di anni fa. Ricordo una lunga discussione su questo tema che ho avuto con Giuseppe O. Longo più di una decina d'anni fa. Alla fine eravamo entrambi d'accordo che i primi processi di lettura e copiatura dell'RNA e/o del DNA dovevano essere considerati come l'inizio di qualcosa di completamente nuovo rispetto agli "enti" e agli "eventi" di natura materiale, erano cioè collegati con l'origine delle informazioni²².

²² Cfr. Pattee 2008; 2015.



Come è stato accennato (cfr. cap. 5), alcuni ricercatori di fisica teorica ritengono che tutto il mondo fisico sia in realtà di natura informazionale. John Archibald Wheeler ha affermato: “It from bit”. Questa affermazione indica che ogni elemento del mondo fisico deriva da informazioni. Secondo Wheeler ogni grandezza del mondo quantistico trae il suo significato ultimo dai “bit”. A suo parere ogni quantità fisica (ogni particella elementare, ogni campo di forza, eccetera) trae la sua funzione, il suo significato e perfino la sua esistenza dalle risposte suscitate a domande che prevedono due risposte equiprobabili “sì o no”, cioè da scelte binarie, dai “bit”²³. Si tratta di una concezione relazionale della conoscenza che implica necessariamente l'esistenza di organismi viventi dotati di capacità cognitive, linguistiche e conoscenze (oppure da macchine costruite da esseri senzienti) in grado di porre domande. Senza organismi viventi niente domande. Senza domande niente risposte!

Il biofisico statunitense Howard Pattee ha sostenuto che i processi di misurazione sono comparsi nel nostro pianeta ben prima dello sviluppo della fisica classica e della meccanica quantistica. Secondo Pattee

²³ Wheeler 1989, p. 309.

L'informazione a livello del DNA

durante i processi di lettura e traduzione dell'RNA e del DNA viene a generarsi una sorta di “taglio epistemico”, che determina per la prima volta in assoluto la separazione tra un “conoscente” e un “conosciuto”, tra un “oggetto” sottoposto a misurazione e un “soggetto” che effettua le operazioni di misurazione (lettura, trascrizione e traduzione)²⁴. Dunque, anche per Pattee questa entità immateriale che chiamiamo “informazione” si è originata per la prima volta sul pianeta Terra più di quattro miliardi di anni fa in occasione della comparsa delle prime macromolecole in grado di autoreplicarsi (RNA e DNA)²⁵. Secondo questa prospettiva l'origine dell'informazione è strettamente collegata con l'origine della vita ed è quindi in relazione con la dimensione biologica.

²⁴ Pattee e Rączaszek-Leonardi 2012.

²⁵ Turner 2015.



7. L'INFORMAZIONE A LIVELLO DEL SISTEMA NERVOSO

Gli animali sono organismi pluricellulari dotati della capacità di muoversi autonomamente; mentre le piante e i funghi non hanno tale capacità. All'interno dei diversi gruppi animali si sono sviluppati una molteplicità di tessuti, organi e sistemi (ad esempio il sistema digerente è composto dallo stomaco, dal pancreas, dal fegato, eccetera; il sistema respiratorio dai polmoni, dalla trachea, dalla laringe; il sistema locomotore dai muscoli, dalle ossa, dai tendini, eccetera). Per quanto riguarda l'elaborazione di informazioni il sistema più importante è senz'altro quello nervoso. Da un punto di vista funzionale le più importanti cellule del sistema nervoso sono i neuroni, la cui caratteristica principale è di essere cellule eccitabili elettricamente e chimicamente.

Il sistema nervoso nei vertebrati (pesci, anfibi, rettili e mammiferi) è organizzato in tre gruppi generali di neuroni: 1) i "neuroni afferenti", chiamati "neuroni sensoriali",

che rappresentano la prima tappa di elaborazione delle informazioni sensoriali; 2) i “neuroni efferenti”, la maggior parte dei quali sono neuroni motori (scheletrici e viscerali); 3) gli “interneuroni”, che formano le reti complesse di elaborazione dell’informazione nervosa. Gli interneuroni rappresentano più del 99% dei neuroni del sistema nervoso umano.

7.1 Le reti neuronali del cervello

Le cellule nervose (neuroni) rappresentano le unità funzionali del sistema nervoso; negli esseri umani tale sistema è costituito da 86 miliardi di cellule nervose. Il cervello umano pesa mediamente 1300 grammi. Si tratta di un sistema complesso che ha lo scopo di integrare le attività dell’organismo e di armonizzarle con le richieste dell’ambiente. I neuroni non lavorano mai isolati ma formano assemblee chiamate *circuiti o reti neuronali*. Alcune reti neuronali sono determinate geneticamente, mentre la maggioranza (soprattutto quelle corticali) si forma in base all’esperienza¹. Una delle scoperte fondamentali della neurofisiologia dello scorso se-

¹ Kandel 2015.

colo è che i neuroni scambiano informazioni prevalentemente attraverso segnali elettrici (potenziali d'azione), che sono dei fenomeni tutto o nulla (simili al codice binario).

Ogni neurone è separato dagli altri neuroni (sia dal punto di vista anatomico che funzionale). Tuttavia, i neuroni si collegano tra di loro attraverso dei punti di contatto chiamati *sinapsi*. Si stima che ogni neurone del sistema nervoso sia collegato mediamente con altri 7000 neuroni. I neuroni scambiano continuamente informazioni tra di loro. Lo fanno liberando, a livello delle sinapsi, molecole chimiche chiamate *neurotrasmettitori*. Le informazioni elaborate da ogni neurone hanno un'influenza sull'attività elettrica lungo la via d'uscita (assone) delle cellule nervose.

Sono stati descritti due tipi di sinapsi: elettriche e chimiche. Nelle "sinapsi elettriche" i due neuroni sono in contatto mediante delle giunzioni comunicanti. Nelle "sinapsi chimiche" (che costituiscono la stragrande maggioranza delle sinapsi del cervello umano) non vi è contatto tra le cellule, poiché sono separate da una fessura sinaptica larga 20-40 nanometri. La comunicazione avviene mediante la diffusione di un neurotrasmettitore. L'arrivo del potenziale d'azione determina nella membrana presinaptica la fusione delle

vescicole contenenti il neurotrasmettitore e la sua liberazione nella fessura sinaptica. Le molecole liberate, dopo aver attraversato la fessura sinaptica, si legano al loro recettore che si trova sul neurone successivo (oppure su una ghiandola o su di un muscolo). La trasmissione chimica coinvolge più di cento neurotrasmettitori (con peso molecolare basso: acetilcolina, dopamina, noradrenalina, serotonina, glutammato, GABA; oppure con peso molecolare alto: polipeptidi).

7.2 *Il connettoma*

L'insieme dei collegamenti che ogni neurone intrattiene con gli altri neuroni è stato chiamato *connettoma*. Si tratta di un diagramma che rappresenta la totalità delle connessioni del sistema nervoso di un particolare essere vivente (diagramma di cablaggio). Il connettoma umano è determinato sia dalle informazioni genetiche sia dall'esperienza. Infatti, esso si modifica continuamente durante la vita di un essere umano, poiché neuroni modificano in maniera continua e dinamica le loro connessioni a seconda delle esperienze².

² Seung 2012, pp. 111-131.

Il primo connettoma a essere stato descritto è quello di un verme, il *Caenorhabditis elegans*, che ha un sistema nervoso composto da soltanto 302 neuroni. La mappa di questo connettoma è reperibile nel sito *wormatlas.org*. Nonostante si tratti di un diagramma con soltanto settemila connessioni ci sono voluti più di dieci anni per riuscire a descriverlo³. Il connettoma umano è 100 miliardi di volte più complesso. Questa cifra è stata ottenuta moltiplicando 86 miliardi di neuroni che compongono il sistema nervoso umano per le 7000 sinapsi stimate per ogni neurone. Il risultato è un quadrilione di connessioni (10^{15})⁴. È stato calcolato che per ogni millimetro cubo di corteccia cerebrale umana ci sia circa un miliardo di sinapsi e diversi chilometri di fibre nervose⁵.

Ogni essere umano ha un connettoma unico e distintivo. Si ha ragione di credere che le caratteristiche mentali di ogni individuo siano in relazione con l'organizzazione anatomica e funzionale dei suoi circuiti neurali. Per questa ragione si ritiene che la descrizione del connettoma di una persona, cioè della totalità delle sue connessioni

³ Varshney *et al.* 2011.

⁴ Seung 2012, p.11.

⁵ Braitenberg e Schüz 1998; Seung 2012, pp. 71-72.

neurale, sia in grado di fornire tutte le informazioni possibili sul funzionamento del suo cervello e della sua mente. Il neuroscienziato Sebastian Seung ha riassunto questi concetti nello slogan: “Noi siamo il nostro connettoma”, tuttavia “non sappiamo ancora se il connettoma contenga i ricordi, la personalità o l'intelletto di una persona. [Infatti] [...] un connettoma potrebbe non contenere *tutta* l'informazione”⁶.

L'ipotesi che la descrizione del connettoma e del suo funzionamento possa rappresentare tutta l'informazione presente in un essere umano è alla base della possibilità – sostenuta da alcuni autori – di raggiungere l'immortalità mediante le tecniche di *trasferimento della mente*⁷. L'ipotesi che guida questi ricercatori (detti *uploader*) si riferisce alla possibile “resurrezione” della mente di un individuo attraverso il trasferimento di tutte le informazioni contenute nel suo connettoma in un computer.

Gli *uploader* non sono materialisti, tuttavia ritengono sia possibile trasferire tutte le “informazioni” che riguardano l'identità personale su supporti differenti da quelli biologici. “L'*uploader* rimprovera il materia-

⁶ Seung 2012, p. 315.

⁷ Ivi, p. 324.



L'informazione a livello del sistema nervoso

lista: “Tu non sei i tuoi atomi, sei lo schema in cui essi sono disposti”; e striglia il meccanicista: “Tu non sei i tuoi neuroni, sei lo schema in cui essi sono connessi”. Il pattern, lo schema, se pure richiede la materia per incarnarsi, appartiene al mondo astratto dell’informazione, e non al mondo concreto della materia”⁸.

7.3 I neuroni digitali

Una delle più grandi scoperte scientifiche di tutti i tempi ha riguardato l’identificazione di un codice di funzionamento binario nelle cellule del sistema nervoso. Questa scoperta ha evidenziato che i neuroni sono in grado di generare impulsi elettrici detti *potenziali d’azione*. Questi segnali sono dei fenomeni “tutto o nulla”, simili al sistema di codificazione binaria (uno o zero) proposto da Claude Shannon nella sua teoria matematica della comunicazione⁹.

⁸ Ivi, p. 342.

⁹ Tuttavia, nel sistema nervoso la comunicazione utilizzando potenziali d’azione è di tipo analogico, affine a quella che nell’ambito delle comunicazioni elettriche viene definita modulazione a posizioni o a frequenza d’impulsi (PPM o PFM).



Il primo potenziale d'azione fu registrato in una fibra nervosa sensoriale da due neurofisiologi, uno inglese, Edgar Adrian (1889-1977), e l'altro svedese, Yngve Zotterman (1898-1982). Essi erano perfettamente consapevoli di aver realizzato una delle più significative scoperte scientifiche, infatti Zotterman descrisse tale evento con le seguenti parole: “Eravamo eccitati, entrambi eravamo del tutto consapevoli che ciò che avevamo appena visto non era mai stato osservato prima e che stavamo scoprendo un grande segreto della vita, in quale modo le fibre sensoriali trasmettono informazioni al cervello”¹⁰.

Le successive ricerche di elettrofisiologia hanno evidenziato che i neuroni presentano un “potenziale di riposo” caratterizzato da una carica elettrica negativa di -65 millivolt (mV). Questo potenziale di riposo è una condizione attiva (richiede consumo di energia), generata da una serie di canali ionici e trasportatori attivi (pompa sodio-potassio). Quando un neurone viene sottoposto a una serie di stimoli (elettrici, meccanici o chimici) varia il potenziale di riposo, aumentando la stabilità elettrica (iperpolarizzazione, passando ad esempio

¹⁰ Gardner e Johnson 2013, p. 462.

a -70 mV) oppure aumentando la sua eccitabilità (depolarizzandosi, passando ad esempio a -60 mV).

Quando un neurone si depolarizza e raggiunge un valore di -55 mV (potenziale critico) si genera nel segmento iniziale dell'assone un "potenziale d'azione" (*spike*), che modifica la frequenza di scarica del neurone. È molto importante sottolineare che i neuroni non sono quasi mai silenti. Essi normalmente presentano una frequenza di scarica che può variare. Per i neuroni della corteccia cerebrale tale attività oscilla da 20 a 200 *spike* al secondo (tenuto presente che la durata di un potenziale d'azione è intorno a un millisecondo, la frequenza massima di scarica è intorno a 500 impulsi al secondo)¹¹.

Poiché il sistema nervoso è formato da reti di neuroni collegati tra di loro, vengono a formarsi dei complessi quadri di attivazione neuronale, caratterizzati da una continua modulazione della frequenza di scarica nelle cellule nervose. In genere, i neurofisiologi, che aderiscono a visioni fisicaliste, utilizzano la metafora del potenziale d'azione (impulso o *spike*) che viaggia lungo l'assone. Si tratta di una metafora fuorviante, che si

¹¹ Cfr. Fabbro 2016, cap. 4.

ispira a una linea di pensiero che ha come riferimento le scienze esatte (fisica), e che – secondo Gregory Bateson – assai facilmente degenera nella elaborazione di sciocchezze, come ad esempio quelle relative ai concetti di “energia psichica” (che dominavano nella fisiologia dell'Ottocento e del Novecento, e che hanno influenzato in maniera significativa il pensiero scientifico-filosofico di Sigmund Freud)¹². Se si ragiona nell'ottica della “teoria dei sistemi” ciò che viaggia non è un impulso (potenziale d'azione) ma una “differenza” (o una trasformata della differenza).

Il singolo impulso nervoso si inserisce e modifica un pattern di attività nervosa (collegato all'attività e alla frequenza di scarica di una rete di neuroni). L'informazione nervosa è dunque collegata alla differenza che si genera nell'attività dei neuroni. Tale differenza non è soltanto in relazione con un impulso nervoso, ma anche con l'assenza di impulsi. Infatti, nella codificazione binaria l'uno e lo zero hanno lo stesso valore informativo; ciò che conta è la loro sequenza. Alla stessa stregua, secondo Bateson “coloro che dicono sciocchezze saranno portati a trascurare il valore informativo dello stato di ripo-

¹² Freud 1895.



L'informazione a livello del sistema nervoso

so. Lo stato di riposo di un assone differisce dall'attività quanto l'attività differisce dal riposo. Pertanto lo stato di riposo e l'attività hanno lo stesso valore informativo¹³.

7.4 Il cervello relativistico

Un tempo si riteneva che l'attività del cervello fosse sostenuta dagli ingressi sensoriali. Secondo questa prospettiva la presenza di input sensoriali permetteva al cervello di essere attivo (veglia), mentre l'assenza di input (tipica del sonno) si riteneva fosse responsabile della sua disattivazione. Tuttavia nella prima metà dello scorso secolo un neuroscienziato spagnolo Rafael Lorente de Nó (1902-1990) mostrò che il sistema nervoso (e in particolare la corteccia cerebrale) è composto da “reti neurali” estremamente complesse, organizzate come dei “circuiti chiusi” o dei “circuiti rientranti”¹⁴. Quando uno di questi circuiti viene eccitato (ad esempio attraverso una stimolazione sensoriale), l'attivazione può riverberare a lungo nel circuito. Inoltre, l'attività di un circuito

¹³ Bateson 1972, p. 350 e p. 470.

¹⁴ Carrillo-Reid e Larriva-Sahd 2020; Hebb 1980, pp. 149-150; Maturana e Varela 1972.



può eccitare un secondo, questo può eccitare un terzo, il quale – a sua volta – può rieccitare il primo circuito e così via.

Negli anni recenti è stata studiata l'attività elettrica in differenti strutture del cervello mediante l'utilizzazione di elettrodi multipli (impianti cronici di micro-elettrodi inseriti a livello della corteccia sensoriale, del talamo, dell'ippocampo e dei gangli della base) in ratti liberi di muoversi¹⁵. In questo modo è stato possibile studiare l'attività elettrica cerebrale in differenti stati di coscienza.

Nella *veglia tranquilla* i ratti sono fermi e non mostrano alcun movimento delle vibrisse. La corteccia cerebrale evidenzia un'attività elettrica desincronizzata con frequenze nella fascia beta (10-30 Hz) e gamma (30-80 Hz). Nell'*esplorazione attiva*, i ratti si muovono ed esplorano l'ambiente. Oltre ad annusare e leccare, compiono *scatti delle vibrisse*. In questa fase l'attività della corteccia diventa ritmica, con oscillazioni da 7 a 12 Hz (sincrona con i movimenti delle vibrisse).

Nel *sonno a onde lente* compaiono prima delle oscillazioni di grande ampiezza da 7 a 12 Hz (fusi del sonno) a cui subentra successivamente una attività elettrica nella fre-

¹⁵ Gervasoni *et al.* 2004.

quenza delle onde delta, di 1-4 Hz, tipiche del sonno profondo. Dopo un certo periodo di sonno a onde lente compare una desincronizzazione dell'attività cerebrale correlata con i movimenti delle vibrisse (una condizione che corrisponde alla fase del sonno paradossale o sonno REM). Il movimento delle vibrisse nel *sonno paradossale* dei ratti indica che la loro attività onirica è molto probabilmente correlata con esperienze tattili.

Questi stati di coscienza (veglia attiva, veglia tranquilla, sonno a onde lente, sonno paradossale), documentati in numerose altre specie di uccelli e mammiferi (incluso *Homo sapiens*), sono generati in maniera autopoietica dall'organismo e per questo vengono definiti "stati dinamici interni". Le diverse attività cognitive, come: la percezione, il ricordo, l'espressione verbale, la comprensione, la lettura, il calcolo, la meditazione, eccetera, vanno interpretate nel contesto degli stati dinamici interni. Ad esempio, lo stesso stimolo sensoriale: un segnale acustico verrà percepito in maniera differente se il soggetto si trova nella veglia attiva o nel sonno paradossale.

Il neuroscienziato brasiliano Miguel Nicolelis ha proposto di definire questo fenomeno come "cervello relativistico". Secondo Nicolelis lo schema dell'attività elettrica che gene-

ra la percezione del mondo in un individuo dipende dalla collisione tra due impulsi spaziotemporali, cioè quello del segnale periferico in entrata (ad esempio un segnale acustico) e lo stato dinamico interno del cervello¹⁶.

7.5 La codificazione sensoriale

Secondo Gregory Bateson la codificazione sensoriale rappresenta il passaggio dal Pleroma (mondo fisico) alla Creatura (mondo informazionale). È noto che nei vertebrati si sono evoluti dei sistemi nervosi complessi in grado di “rappresentare” il mondo in maniera tale da permettere la loro sopravvivenza e riproduzione¹⁷. Gli studi di etologia, antropologia e neuroscienze, accanto alle riflessioni filosofiche, hanno permesso di comprendere che le percezioni non sono delle semplici copie del mondo esterno, ma delle rappresentazioni complesse che si originano dalla interazione di un organismo (dotato di un particolare cervello) con l'ambiente.

Una componente fondamentale della percezione è collegata all'origine delle informazioni sensoriali. Esse sono in relazione

¹⁶ Nicolelis 2011, p. 314; cfr. Llinás 2001.

¹⁷ Craik 1943; Jerison 1973; Hoffman 2020.

con: 1) i cinque sensi (vista, udito, olfatto, gusto e tatto); 2) le sensazioni somatiche (propriocezione, dolore, prurito, temperatura corporea); 3) le sensazioni viscerali e quelle vestibolari. La trasformazione della materia (massa ed energia) del mondo fisico in informazioni avviene attraverso un processo di codifica nervosa nei recettori di un particolare sistema sensoriale.

La funzione di ogni recettore sensoriale è quella di convertire un segnale sensoriale in un segnale elettrico (*trasduzione sensoriale*); quest'ultimo genera una "informazione" (ossia una differenza nella frequenza di scarica di una linea sensoriale). Ogni tipo di recettore (cutaneo, visivo, uditivo, ecc.) è, infatti, sensibile a un particolare tipo di stimolo (*specificità del recettore*). Questa fondamentale caratteristica, descritta da Charles Bell (1774-1842) e Johannes Müller (1801-1858), è nota come "teoria della specificità sensoriale". Quindi, se un recettore visivo viene stimolato mediante un'onda elettromagnetica, oppure mediante la compressione degli occhi, l'individuo sperimenterà sempre delle percezioni visive.

Il punto di passaggio dal mondo fisico a quello mentale è rappresentato dalla trasformazione di un potenziale di recet-

tore (analogico) in un potenziale d'azione (*spike*)¹⁸. Il potenziale d'azione, pur utilizzando dei processi elettrochimici (mondo del Pleroma), non è più soltanto un fenomeno fisico ma è qualcosa in grado di generare una “differenza” nell'attività di un neurone, o meglio di generare una “differenza” nell'attività (elettrofisiologica) di una rete neuronale, cioè di generare una *informazione* (mondo della Creatura). Nei recettori sensoriali (tattili, termici, dolorifici, propriocettivi, visivi, uditivi olfattivi, eccetera) gli stimoli analogici vengono trasformati (codificati) in segnali digitali, con *codici* caratteristici di trasmissione delle informazioni¹⁹. L'integrazione delle informazioni sensoriali e la loro elaborazione, nei centri nervosi multisensoriali (ad esempio nei collicoli superiori, nel talamo e nella corteccia associativa), determina la generazione di una “scena” che comprende uno sfondo e degli oggetti posti di fronte a un soggetto²⁰.

¹⁸ Windhorst 2008, p. 3665.

¹⁹ von Neumann 1958, p. 127.

²⁰ Edelman 1992; 2004; per una analisi neuropsicologica della generazione della “scena” cfr. i paragrafi 8.2 e 8.3 di questo saggio.



7.6 Quantificare l'informazione neuronale

Il “sistema visivo” è coinvolto nella elaborazione della maggior parte delle informazioni sensoriali. È stato calcolato che per ciascuna finestra temporale (*frame* = 50-65 millisecondi), vengano elaborati circa 49 milioni di bit. Gli algoritmi di compressione digitale e le ricerche di psicofisiologia riducono la quantità di informazione per ogni *frame* visiva a 25.000 bit²¹. Mentre per quanto riguarda le informazioni elaborate del “sistema uditivo” si stima che ogni *frame* uditiva di 2 millisecondi contenga un valore grezzo di 26.000 bit; mediante algoritmi di compressione e attraverso studi sperimentali di psicofisica si è valutato che l'informazione presente in ogni *frame* uditiva è di circa 320 bit²².

È stato stimato che per ciascuna *frame* del sistema “gustativo” e quello “olfattivo” vengono elaborate 40 bit²³. Lo studio delle informazioni elaborate dal sistema sensoriale “tattile” ha permesso di stimare che il contenuto informativo di ciascuna *frame*

²¹ Pitkow e Meister 2014; Moreno-Bote *et al.* 2014; Knight 2025, pp. 3-4.

²² McDermott e Simoncelli 2011; Knight 2025, pp. 4-5.

²³ Bushidid *et al.* 2014; Koulakov *et al.* 2014; Peng *et al.* 2015; Knight 2025, p. 5.



tattile sia di 150.000 bit²⁴. Se si sommano le informazioni elaborate da sistemi sensoriali (visivo, uditivo, gustativo, olfattivo e tattile) si arriva a una stima complessiva di circa 200.000 bit per *frame* sensoriale²⁵.

Poiché negli esseri umani la durata di ogni *frame* consapevole è di circa 50-70 milisecondi, in ogni secondo sono presenti 15-20 *frame*. Se stimiamo che un essere umano possa vivere cento anni, la sua vita consisterà di 47 miliardi di *frame* (15 *frame* per secondo $\times$ 60 secondi al minuto $\times$ 60 minuti all'ora $\times$ 24 ore al giorno $\times$ 365, 25 giorni all'anno $\times$ 100 anni)²⁶. Dato che ciascuna *frame* sensoriale contiene 200.000 bit di informazione, il totale dell'informazione sensoriale elaborata da un essere umano durante la sua vita è stata stimata a 9.46×10^{15} bit²⁷.

Oltre all'informazione elaborata nei sistemi sensoriali è stata stimata anche l'informazione presente nelle strutture cerebrali. Il numero complessivo di cellule nervose presenti nel cervello umano è 86 miliardi (26 miliardi

²⁴ Bensman e Hollins 2005; Weber *et al.* 2013; Knight 2025, p. 5.

²⁵ Knight 2025, p. 6.

²⁶ Questo valore dovrebbe essere ridotto poiché durante il sonno a onde lente (circa 4-6 ore al giorno) si riduce drasticamente l'entrata di informazione sensoriali.

²⁷ Knight 2025, p. 6.

di neuroni sono presenti nella corteccia cerebrale e 60 miliardi nel cervelletto)²⁸. Una serie di studi di istologia computazionale ha permesso di stimare che ogni neurone presenta da 1000 a 10.000 contatti sinaptici, con una media di 7000 contatti sinaptici per neurone²⁹. Se si assume l'ipotesi che i neuroni funzionino come dei sistemi binari (attivi/non attivi) Andrew Knight ha stimato che il massimo dell'informazione immagazzinata nei neuroni è: $8,6 \times 10^{10}$ neuroni $\times$ 1 bit/neurone = $8,6 \times 10^{10}$ bit³⁰.

Alcuni studi di teoria dell'informazione applicata alle neuroscienze hanno cercato di valutare la quantità di informazione elaborata in ciascuna sinapsi del cervello. È stato ipotizzato che ciascuna sinapsi del cervello umano elabori circa 4,7 bit³¹. Sulla base di questo valore Knight ha stimato che l'informazione immagazzinata a livello di tutte le sinapsi del sistema nervoso centrale umano: $8,6 \times 10^{10}$ neuroni $\times$ 7000 sinapsi per neurone $\times$ 4,7 bit per sinapsi = $2,8 \times 10^{15}$ bit³².

²⁸ Herculano-Houzel 2009; von Bartheld *et al.* 2016.

²⁹ DeFelipe 2011; Tang *et al.* 2001; Kasthuri *et al.* 2015.

³⁰ Knight 2025, p. 7.

³¹ Varshney *et al.* 2006; Bartol *et al.* 2015.

³² Bartol *et al.* 2015; Markram *et al.* 2015; Knight 2025, p. 7.

Da questa analisi sulla quantità di informazioni (9.46×10^{15} bit) presenti nelle strutture del sistema nervoso rispetto alle informazioni elaborate nei sistemi sensoriali ($2,8 \times 10^{15}$ bit), Andrew Knight ha sostenuto che lo stato di coscienza collegato all'attività percettiva svolta durante la veglia richieda un valore circa tre volte superiore rispetto all'informazione presente a livello neuroanatomico³³.

7.7 La computazione biologica

Come i computer anche il cervello umano è in grado di eseguire computazioni, ossia di manipolare “un qualsiasi insieme di simboli in base a un insieme di regole”³⁴. Tuttavia vi sono differenze notevoli tra il funzionamento del cervello umano e quello dei computer. Secondo il neuroscienziato statunitense Read Montague il cervello degli esseri umani è un sistema computazionale estremamente

³³ Knight 2025, p. 8. Secondo Max Tegmark il nostro cervello conserva 10 gigabyte di informazione per quanto riguarda l'attività elettrica e 100 terabyte per quanto riguarda la forma chimica/biologica (che include anche le informazioni che riguardano le sinapsi), cfr. Tegmark 2017, p. 88.

³⁴ Montague 2006, p. 29.

efficiente: 1) consuma poca energia (soltanto 20 watt); 2) computa in maniera più lenta (la generazione di impulsi elettrici negli elaboratori elettronici è circa un milione di volte più veloce rispetto al cervello umano); 3) non si surriscalda (gli impulsi elettrici presenti nei computer dissipano più calore rispetto ai potenziali d'azione); 4) risparmia spazio (riducendo la possibilità di generare errori); 5) risparmia banda (la velocità di scarica di un neurone è mediamente da 20 a 60 *spike* al secondo, talvolta per brevi periodi i neuroni possono scaricare a frequenze maggiori mentre i personal computer presentano un range di scarica di miliardi di impulsi al secondo).

Oltre a queste caratteristiche il cervello umano ha degli scopi (fini, obiettivi, lo stato desiderato)³⁵. Gli scopi rappresentano il metro di misura in base al quale valutare le prestazioni, mediante l'assunzione di segnali di errori. Parecchi obiettivi che il nostro sistema nervoso è in grado di elaborare non sono accessibili alla coscienza. Poiché gli animali sono organismi dotati di mobilità, cioè agiscono in un ambiente, per sopravvivere debbono essere in grado di valutare le risorse disponibili e valutare quali siano le

³⁵ Ivi, p. 47.

scelte più efficaci per procurarsi tali risorse. Così sono state selezionate delle creature che sono in grado di “dare valore alle azioni che intendono compiere. Attraverso i sistemi di apprendimento per rinforzo viene generato a livello neuronale un collegamento tra scopi, valori e norme di orientamento. Qualcosa di simile accade nei sistemi di *machine learning* che sostengono i programmi generativi di intelligenza artificiale³⁶.

Un'ulteriore differenza è rappresentata da una massiccia elaborazione delle informazioni in parallelo e dal continuo alternarsi nelle varie stazioni del sistema nervoso di segnali digitali (impulsi nervosi) che si alternano a segnali analogici (modificazioni graduate dei potenziali elettrici postsinaptici)³⁷. Anche i computer attuali eseguono programmi con notevole grado di parallelismo, sebbene molto inferiore a quello del sistema nervoso umano. Inoltre, gli organismi di

³⁶ In generale i *Large Language Model* (LLM) come ChatGPT imparano (principalmente) per insegnamento supervisionato, non per rinforzo. Mentre i programmi allenati a giocare a giochi come gli scacchi o per la robotica usano prevalentemente l'apprendimento per rinforzo (*reinforcement learning*).

³⁷ Si distinguono due tipi di potenziali postsinaptici: “eccitatori” (*Excitatory Post-Synaptic Potentials*) e “inibitori” (*Inhibitory Post-Synaptic Potentials*), cfr. Fabbro 2016, cap. 4.

ogni specie possiedono una specifica morfologia (che riguarda sia il corpo sia il sistema nervoso), frutto di una complessa storia evolutiva. Come è stato accennato la morfologia corporea e cerebrale rappresenta un enorme serbatoio di informazioni.

7.8 Le interfacce cervello-macchina

Un'interfaccia cervello-macchina (*Brain-Machine Interface*, BMI) è costituita da quattro componenti generali: 1) un sistema di registrazione composto da molti elettrodi in modo da riuscire a misurare l'attività elettrica di un esteso gruppo di neuroni (a livello intra-cerebrale oppure sulla superficie del cervello); 2) un computer che elabora in tempo reale i segnali nervosi, trasformando i potenziali d'azione in un segnale definito "impulso motorio di controllo", che viene inviato tramite telemetria a un arto artificiale; 3) un braccio robotico dotato di un ricevitore e di un attuatore meccanico; 4) dei sistemi di *feedback* visivo, tattile e propriocettivo che inviano informazioni (al cervello) sui movimenti compiuti dal braccio meccanico³⁸.

³⁸ Nicoletti 2011, p. 161.

I primi studi con le interfacce cervello-macchina hanno evidenziato che era necessario registrare l'attività di un insieme di cellule nervose (non di un unico neurone) per ottenere le informazioni necessarie a sviluppare (con opportuni programmi che possono includere anche procedure di *machine learning*) l'impulso motorio di controllo atto a muovere un attuatore meccanico (arto artificiale). Inoltre, l'interfaccia era in grado di funzionare se l'elaboratore elettronico riusciva ad analizzare i dati e fornire un risultato entro delle finestre temporali inferiori a 300 millisecondi³⁹.

Negli animali sottoposti a questo tipo di esperimenti (ratti e scimmie) il sistema di interfaccia cervello-macchina veniva addestrato in più fasi. Nella prima fase il sistema imparava a correlare l'attività elettrica cerebrale (registrata con il sistema multi-elettrodo) con l'attività muscolare dell'animale (sollevare una barretta oppure guidare il cursore per inseguire un segnale luminoso su di un monitor). Nella seconda fase il sistema veniva addestrato a estrarre le informazioni presenti nell'attività elettrica cerebrale in modo da riuscire a elaborare in tempo reale un "impulso motorio di controllo" capace di

³⁹ Nicoletis e Chapin 1994.

muovere un attuatore meccanico. La terza e ultima fase consisteva nel riuscire a guidare efficacemente un attuatore meccanico soltanto con il pensiero.

Nella seconda fase gli animali sottoposti a esperimento (scimmie) potevano utilizzare sia la loro mano sia un dispositivo robotico per muovere un cursore. Quando i movimenti del dispositivo robotico erano diventati precisi è stata esclusa la possibilità di utilizzare il cursore guidato manualmente. A quel punto la scimmia poteva svolgere il compito utilizzando soltanto l'arto robotico. Per raggiungere il bersaglio (e ottenere la ricompensa), la scimmia "doveva *immaginare* i movimenti del braccio che desiderava fossero eseguiti dal braccio meccanico o dal robot"⁴⁰. A quel punto soltanto i suoi pensieri potevano guidare il braccio robotico. Poiché l'animale non aveva più a disposizione il joystick, per qualche minuto continuava a muovere il braccio e la mano, ma dopo un po' imparò a muovere l'arto robotico soltanto con il pensiero. L'attività cerebrale dell'animale era dunque in grado di tradurre le intenzioni volontarie in atti motori attraverso delle interfacce elettroniche⁴¹.

⁴⁰ Nicolelis 2011, p. 185.

⁴¹ Ivi, p. 186, pp. 251-256; Maravita *et al.* 2003.

Numerose ricerche teoriche e sperimentali sono state dedicate alla possibilità di ripristinare il controllo motorio in pazienti con paralisi completa degli arti (dovuta per esempio a sezione del midollo spinale)⁴². L'obiettivo consiste nello sviluppo di sistemi non invasivi di registrazione ed elaborazione dell'attività elettrica cerebrale (simili all'elettroencefalografia) che siano in grado di guidare attuatori meccanici, come braccia e mani artificiali, esoscheletri o carrozzelle in individui con disabilità motoria grave⁴³. Recentemente sono stati messi a punto degli esperimenti per valutare la possibilità di realizzare delle interfacce cervello-macchina-cervello⁴⁴.

Un dato molto importante dal punto di vista filosofico consiste nel fatto che spesso gli esseri umani non sanno “come” e “quali” caratteristiche del segnale elettrico registrato nei diversi neuroni cerebrali venga elaborato dai sistemi di *machine learning* per ottenere l’“impulso motorio di controllo”. I sistemi di calcolo, che utilizzano reti neurali artificiali, vengono addestrati a elaborare il segnale e, via via, a confrontare quanto da loro

⁴² Bouton *et al.* 2016.

⁴³ Presacco *et al.* 2011; Lebedev e Nicolelis 2017; Selfslagh *et al.* 2019.

⁴⁴ Jiang *et al.* 2019; Andersen *et al.* 2022.

L'informazione a livello del sistema nervoso

elaborato (e i vari impulsi motori di controllo) con i risultati raggiunti. Questi sistemi non ci permettono di capire come funzioni il cervello. Ci permettono di ottenere delle complesse strumentazioni tecnologiche che agiscono in maniera efficace. Con l'avvento dei sistemi di interazione cervello-macchina la conoscenza sulle modalità di funzionamento del cervello non si è modificata di molto. Anche in questo settore, sappiamo fare molto più di quello che siamo in grado di capire!



8. L'INFORMAZIONE A LIVELLO DELLA PSICHE

La capacità di costruire dei “modelli del mondo” rappresenta una strategia evolutiva che numerosi gruppi animali, dotati di motilità autonoma, hanno sviluppato. Questi “modelli mentali” permettono agli animali di rappresentare l'ambiente, nel quale sono presenti oggetti e organismi (predatori e prede), e sé stessi. Uno dei vantaggi evolutivi collegati alla capacità di realizzare dei modelli mentali è collegato alla possibilità di sviluppare simulazioni (generare progetti, predire eventi), che permettono di compiere scelte tra le diverse opzioni possibili.

Anche gli organismi molto semplici, come il batterio *Escherichia coli*, sono in grado di elaborare un modello semplificato del mondo, ad esempio in relazione alla presenza dell'aminoacido aspartato (§ 5.2) o del lattato nell'ambiente (§ 6.3). Essi sono in grado di costruire dei modelli del mondo grazie alla capacità di elaborare informazioni (ossia avere a disposizione dei recettori per il lattato, dei sistemi di regolazione e lettura

del DNA relativo alla codifica di un enzima atto a degradare il lattato, eccetera). Tuttavia, i modelli più elaborati del mondo (ossia quelli più dettagliati) sono stati sviluppati soltanto da alcuni gruppi animali (vertebrati, insetti, molluschi, vermi), dotati di sistemi nervosi complessi, in grado di elaborare una quantità di informazioni sufficiente per generare una mente (psiche).

8.1 *L'architettura generale della mente*

Nella prima metà dello scorso secolo, un giovane psicologo scozzese, Kenneth Craik (1914-1945) ha proposto uno dei modelli più interessanti della mente. Secondo questo ricercatore la psiche (umana e animale) può essere rappresentata in maniera schematica come composta da tre processi generali¹. Il *primo processo* è costituito dalla “traduzione” degli stimoli del mondo esterno in “simboli”. Negli esseri umani i simboli sono costituiti da immagini, parole e numeri. Si è scoperto che diversi animali non umani, come cani, gatti, colombi, sono in grado di elaborare concetti mentali (collegati alle immagini mentali), cioè raggrup-

¹ Craik 1943, p. 32.

pare categorie di oggetti (come sedie, automobili, case, eccetera). Il *secondo processo* è costituito dalla elaborazione mentale dei simboli attraverso il ragionamento, il calcolo (negli umani), oppure attraverso dei processi impliciti di “calcolo” caratteristici di ogni specie animale. Il *terzo processo* è costituito dalla ritraduzione dei simboli in processi esterni, ossia in azioni.

Secondo Kenneth Craik una delle forme di simbolizzazione più generale è costituita dalla misurazione. Infatti, ogni misurazione si articola in tre momenti. Il primo momento è costituito dalla attribuzione di un numero a un'entità esterna, ad esempio possiamo misurare i due lati di una casa, la lunghezza = 10 metri, la larghezza = 6,5 metri. Il secondo momento è costituito da una procedura di calcolo; una volta che abbiamo misurato la lunghezza e la larghezza di una casa ne possiamo calcolare la superficie: $10 \times 6,5 = 65$ metri quadrati. Il terzo momento si riferisce alla ritraduzione dei risultati ottenuti. Sulla base delle misurazioni e del calcolo effettuato siamo in grado di sapere quante tavole di abete o larice debbo acquistare se desidero avere un pavimento di legno. Secondo Craik il simbolismo rappresentato dalle operazioni di misurazione è molto potente, poiché quasi

ogni cosa del mondo può essere misurata e quindi rappresentata con un numero².

Le idee di Kenneth Craik sono state applicate in numerosi settori che spaziano dalla psicologia alla biologia e all'informatica. Secondo questa prospettiva gli organismi viventi sono stati considerati come dei sistemi omeostatici che sono (o contengono) una rappresentazione del loro ambiente³. Un sistema omeostatico è in grado di riconoscere alcuni stimoli dell'ambiente, questi sono trasformati – mediante opportuni codici simbolici – in “informazioni”. A loro volta le informazioni vengono elaborate dal sistema in modo da permettere la costruzione di rappresentazioni (del sé e del mondo), utilizzate per effettuare simulazioni (di possibili azioni) e operare scelte⁴. L'adeguatezza di queste rappresentazioni, simulazioni e scelte è dimostrata dal fatto che il sistema omeostatico continua ad autoconservarsi e nel caso degli organismi viventi a sopravvivere e a riprodursi.

Un organismo vivente (come pure un sistema omeostatico) possiede dei dispositivi (recettori) in grado di registrare alcuni stimo-

² Ivi, p. 56.

³ Young 1964, pp. 23-24; Friston 2010.

⁴ Questi modelli sono stati utilizzati per costruire delle “menti” artificiali, cfr. Alexander 2000.

li o eventi fisici dell'ambiente. I "recettori" sono in grado di rappresentare i mutamenti dell'ambiente fisico che sono significativi per un essere vivente, mediante la "traduzione" (codificazione) degli stimoli o eventi fisici (esterni) in "segnali" (interni) che circolano nei canali di comunicazione. In questo modo vengono a generarsi delle "informazioni", che sono opportunamente elaborate nei "centri di calcolo" dell'organismo. La decodificazione delle informazioni nei canali efferenti – attraverso l'utilizzazione di specifici attuatori – permetterà all'organismo di sviluppare azioni efficaci nel mondo fisico. L'appropriatezza del sistema omeostatico, ossia della corretta selezione degli stimoli o eventi fisici, della codificazione e trasmissione dei segnali, della elaborazione delle informazioni "è dimostrata dal fatto che l'omeostato continua a conservarsi. In questo senso diremo che l'organismo è (o contiene) una rappresentazione del suo ambiente"⁵.

8.2. La migliore teoria della mente

Nonostante l'enorme mole di ricerche compiute all'interno delle neuroscienze sono

⁵ Young 1964, p. 24.

state elaborate poche significative teorie della mente. A tale riguardo lo psicologo canadese Keith Oatley ha sostenuto che “la ricerca sul cervello continua in un’atmosfera di eccezionale povertà di idee”⁶. Tra le non molte teorie disponibili, la migliore a parere del filosofo statunitense John Searle (1932-2025) è il “darwinismo neuronale”⁷, una teoria sviluppata da Gerald Edelman (1929-2014).

Si tratta di una “teoria neurobiologica” perché secondo Edelman non è possibile comprendere la psiche e la coscienza senza conoscere l’organizzazione morfologica del cervello. La “teoria del darwinismo neuronale” si basa su tre sistemi neuropsicologici: 1) il sistema delle organizzazioni topologiche principali, 2) il sistema neurologico di riconoscimento, e 3) il sistema della categorizzazione percettiva e della generazione della coscienza⁸.

1) Il “primo sistema” è quello delle *organizzazioni topologiche* principali ed è formato: 1a) dal complesso talamo-corticale, 1b) dal complesso dei gangli della base, e 1c)

⁶ Oatley 1978, p. 61.

⁷ Searle 1997, 2002, 2004.

⁸ Edelman 1987, 1990, 1992, 2004, Edelman e Tononi 2000.

dal complesso dei valori. Il primo di questi complessi, quello “talamo-corticale” (1a), è composto dalla corteccia cerebrale (che presenta circa 10^{14} circuiti neurali), dal talamo (un nucleo profondo del cervello disposto sopra il tronco dell'encefalo) e dalle loro reciproche connessioni (talamo-corticali e cortico-talamiche). Questo complesso rappresenta il fondamento anatomico dei *circuiti di rientro*, un insieme di reti neurali coinvolte nell'analisi delle informazioni sensoriali, motorie, affettive e cognitive. La seconda componente delle organizzazioni topologiche principali si riferisce ai “gangli della base” (1b). Si tratta di una serie di nuclei (n. caudato, n. putamen, *globus pallidus*, *substantia nigra*) posti sotto la corteccia cerebrale e coinvolti nell'iniziativa motoria, nella regolazione del movimento, nella memoria procedurale e nella formazione di categorie percettive. Nei gangli della base prevalgono i circuiti inibitori. La terza componente è chiamata “complesso dei valori” (1c), è formata da un insieme di nuclei disposti nel tronco dell'encefalo (*locus coeruleus*, nuclei del rafe, nuclei colinergici, nuclei dopaminergici, sistema delle endorfine), responsabili della liberazione di neurotrasmettitori coinvolti nelle funzioni di ricompensa o punizione.

2) Il secondo sistema di *riconoscimento* è basato sulla selezione dei gruppi neuronali (darwinismo neurale) e si compone di tre fasi: a) la selezione durante lo sviluppo (repertorio primario), b) la selezione esperienziale (repertorio secondario) e c) i processi di rientro. Secondo Edelman le unità di base del sistema nervoso non sono i singoli neuroni ma dei “gruppi neuronali” (composti da 50 fino a 10.000 neuroni collegati tra di loro). 2a) Questi gruppi neuronali si formano durante le prime fasi di sviluppo e dipendono da variabili casuali (stocastiche) quali: il prolungamento e la ramificazione degli assoni, dei dendriti e sullo sviluppo delle sinapsi. 2b) Nel corso delle diverse esperienze della vita alcune connessioni neurali possono essere rafforzare altre indebolite, in questo modo un certo numero circuiti neuronali sono attivi, mentre altri circuiti presentano livelli più bassi di attività (*selezione esperienziale*). L'insieme dei circuiti attivi e meno attivi è collegato con i sistemi della memoria. 2c) La selezione di gruppi neuronali nella fase di sviluppo (repertorio primario) e la selezione esperienziale (repertorio secondario) determinano la formazione di *mappe neurali* collegate mediante connessioni con parallelismo massiccio, che operano nei due sensi (*top down* e *bottom up*), e sono stati

definiti come “processi di rientro”. Secondo Edelman questi processi di rientro sono la base anatomo-fisiologica che permette alla psiche di emergere al di sopra dell’attività elettrica cerebrale.

3) Il “terzo sistema” è responsabile della “genesì delle categorizzazioni”. Secondo Edelman il mondo fisico è un luogo senza etichette⁹. L’universo fisico è un luogo dove tutto è unito in maniera indifferenziata, dove non vi sono oggetti, né reali distinzioni tra le cose. Le distinzioni vengono introdotte dagli organismi viventi. Soltanto attraverso l’attività del cervello, gli animali riescono a ordinare il loro ambiente in categorie. A parere di Edelman i processi di rientro permettono di associare tra di loro le diverse mappe (sensoriali, motorie, associative) per formare delle “mappe globali” relative alla categorizzazione percettiva degli oggetti. L’apprendimento di nuove categorizzazioni percettive e la loro memorizzazione dipende dalle azioni di rinforzo esercitate dal complesso dei valori. Questo complesso agisce in maniera tale che l’attività di riconoscimento soddisfi i bisogni omeostatici, appetitivi e affettivi stabiliti nel corso dell’evoluzione. L’insieme dei sistemi neuronali che costi-

⁹ Edelman 1992, p. 155.



tuiscono le mappe globali rappresentano le basi anatomofisiologiche della memoria. Dato che i processi di richiamo della memoria non sono stereotipati ma di tipo costruttivo, ne consegue che la memoria dipenda da processi di ri-categorizzazione. La formazione di categorie concettuali (memoria semantica) è presente non soltanto in *Homo sapiens* e in altre specie di mammiferi ma anche negli uccelli (colombi)¹⁰.

8.3 Come la psiche si auto-eleva dal mondo fisico

La presenza di circuiti rientranti in tutte le modalità sensori-motorie rende possibile lo sviluppo di una categorizzazione concettuale complessa, composta da percezioni concomitanti, a questo punto – secondo Edelman – si realizza un *boot-strap*, una auto-elevazione di tutte le modalità sensoriali, che consente la costruzione di una *scena complessa*, cioè “un insieme, ordinato spazialmente e temporalmente, di categorizzazioni di eventi conosciuti e non conosciuti, alcuni legati ad altri eventi della scena da connessioni fisiche o casuali e altri senza legami di questo

¹⁰ Herrnstein 1979; 1990, Cook e Smith 2006.



tipo”¹¹. Inoltre, la scena complessa appare a un “testimone” che è costituito – momento per momento – dalla integrazione della memoria, dalle risposte corporee e dai segnali percettivi¹².

Negli esseri umani l’esperienza di vivere all’interno di una “scena complessa”, dove sono disposti agenti e oggetti all’interno di un ambiente (il mondo nel quale siamo immersi), viene definita “esperienza fenomenica” ed è il risultato di un insieme di categorizzazioni percettive che si riferiscono secondo Edelman a un “presente ricordato”¹³. Infatti, la scena che abbiamo di fronte agli occhi in questo preciso momento è costruita sulla base di categorizzazioni percettive sviluppate nel passato (più o meno immediato).

Il presente ricordato, ossia la scena complessa che sta di fronte a noi costituisce una forma di “coscienza primaria”, dato che l’individuo non è ancora consapevole di sé stesso (si pensi ad esempio allo stato di coscienza di un bambino di due anni). Negli esseri umani si è sviluppata un’ulteriore

¹¹ Edelman 1992, pp. 184-185.

¹² Edelman 2004, pp. 111-114.

¹³ Edelman 1992, p. 187.

forma di coscienza, considerata di ordine superiore. Si tratta dell'autocoscienza, che si pensa possa essere collegata al linguaggio e alla memoria episodica, ossia alla capacità di generare nel momento presente dei modelli del passato e del futuro.

Secondo Edelman la psiche presenta caratteristiche fenomeniche (*qualia*), che emergono dall'enorme quantità di interazioni rientranti sviluppate da numerosissime mappe neuronali. I *qualia* sono caratteristiche di ordine elevato della scena complessa e la coscienza può essere considerata come una successione di *qualia*. Secondo Edelman la psiche (P) emerge dall'enorme attività dei processi neurali presenti nel sistema nervoso (N), tuttavia P non può esercitare alcuna forza fisica, (né direttamente né mediante proprietà di campo) su N e quindi sul mondo fisico. In questa maniera il mondo fisico è casualmente chiuso, può rispondere soltanto agli eventi neurali che costituiscono N¹⁴.

Questa concezione filosofica inserisce la teoria della mente sviluppata da Edelman nel quadro dell'epifenomenismo. Secondo l'epifenomenismo la psiche è considerata come un prodotto dell'attività cerebrale.

¹⁴ Edelman 2004, pp. 66-67, p. 97 e p. 113.

Questa concezione riconosce un'autonomia ontologica alla dimensione psichica¹⁵, tuttavia ritiene che il livello mentale non abbia alcuna influenza causale sull'attività del cervello e sul mondo fisico. La mente diventa quindi un epifenomeno, una manifestazione accessoria, che non ha alcuna incidenza reale sul comportamento di un individuo. L'idea che la mente e la coscienza non abbiano alcuna effettiva utilità è stata ritenuta insostenibile da diversi autori¹⁶. Ad esempio, Karl Popper (1902-1994) nel saggio *La selezione naturale e la comparsa della mente* (1978) ritiene che le facoltà mentali presenti negli umani e in numerosi altri animali offrano un sicuro vantaggio evolutivo, ne consegue che esse sono in grado di influire sulle azioni degli animali e degli esseri umani¹⁷.

8.4 *La teoria della mente predittiva*

Una delle principali funzioni della mente (psiche) consiste nella capacità di produrre simulazioni del futuro. Per riuscire a sviluppare delle predizioni corrette il si-

¹⁵ Searle 1997, p. 176.

¹⁶ Chalmers 1996; Revonsuo 2010, p. 13; Humphrey 2011.

¹⁷ Popper 1978, p. 15; Searle 2004, p. 211.

stema deve essere in grado di conservare delle conoscenze riferite agli eventi accaduti nel passato e riconoscere e correggere eventuali errori commessi. Inoltre, poiché il mondo fisico è caratterizzato da incertezza, rumore e ambiguità, la mente deve essere in grado di elaborare una rappresentazione probabilistica delle informazioni, in modalità simili a quelle descritte da un modello statistico molto noto: il teorema di Bayes¹⁸.

Secondo il modello della mente predittiva¹⁹, la psiche utilizza una serie di conoscenze pregresse (che possono essere in relazione con informazioni genetiche e con esperienze passate), per produrre una serie di modelli anticipatori della realtà (ipotesi sullo stato del mondo) che esercitano delle influenze, mediante una serie di connessioni *top-down*, sui segnali sensoriali in ingresso. In questo modo il contenuto delle percezioni dipende fortemente dalle diverse ipotesi generate dal sistema mentale; alla fine del processo percettivo una delle ipotesi generate verrà selezionata basandosi sulla discrepanza tra il segnale sensoriale atteso e quello ricevuto (errore di predizione).

¹⁸ Knill e Pouget 2004; Vilares e Kording 2011.

¹⁹ Clark 2024.

Secondo la teoria della mente predittiva, la psiche esercita nei processi percettivi e più in generale sui processi mentali (memoria, emozioni, coscienza) un ruolo attivo molto significativo, simile per certi versi a quanto aveva sostenuto Immanuel Kant a riguardo dei processi conoscitivi. Secondo Kant durante il processo conoscitivo il soggetto non accoglie semplicemente un “oggetto” ma è necessario che l’oggetto si conformi alle regole e alle strutture imposte dal “soggetto”. “Nella filosofia trascendentale l’oggetto si presenta tale e quale è al soggetto perché il soggetto lo struttura, lo organizza sulla base delle proprie leggi e dei propri principi puri e a priori”²⁰.

Una prima versione della teoria della mente predittiva è stata avanzata nella seconda metà dell'Ottocento dal fisiologo e filosofo tedesco Hermann von Helmholtz (1821-1894). Secondo Helmholtz la percezione del mondo non dipende semplicemente da una sorta di lettura dei segnali esterni, ma dalla convergenza delle informazioni sensoriali con una serie di dati acquisiti nelle esperienze passate, un processo di integrazione che questo autore definiva *inferenza inconscia*²¹. Più recentemente il neuroscien-

²⁰ Rumore 2025, p. 41.

²¹ Gardner 1985, p. 118.

ziato inglese Karl Friston ha proposto una teoria matematica della capacità degli organismi di migliorare il processo inferenziale (*teoria dell'inferenza attiva*)²².

Secondo queste teorie la psiche è costituita da un'attività di simulazione mentale continuativa, che prevede una serie di ipotesi generate in parallelo e riferite alla realtà esterna. Non si tratta semplicemente di un filo di narrazione unitario²³ (o da un unico film mentale)²⁴ quanto piuttosto di una serie di narrazioni simil oniriche che vengono generate di continuo nella mente. Secondo questa prospettiva la "realtà" origina dalla comparazione tra le informazioni sensoriali attese (in base alle simulazioni mentali) e le informazioni sensoriali reali, questa comparazione permette di selezionare un tipo di simulazione (sogno o film) rispetto a una serie di altre rappresentazioni che vengono scartate. La teoria della mente considera come prodotti psichici simili l'attività onirica (sogni), l'immaginazione, la memoria e la percezione.

Nella teoria predittiva (*prediction machine*) la maggior parte del lavoro mentale viene

²² Friston 2010; Koster-Hale e Saxe 2013.

²³ Seth 2019.

²⁴ Naccache 2020.



L'informazione a livello della psiche

effettuato dai sistemi di elaborazione delle ipotesi percettive (*top-down*), mentre il flusso sensoriale che sale dalla periferia verso il centro (*bottom-up*) si limita soltanto alla calibrazione delle previsioni. In questa teoria della mente la percezione corrisponde a un processo mentale costruttivo, molto simile a una sorta di “allucinazione controllata”²⁵. Numerose conferme sperimentali sostengono la teoria della mente predittiva. Ad esempio, le strutture neuroanatomiche centrali (corteccia, talamo, mesencefalo) che controllano con modalità *top-down* le vie sensoriali ascendenti (*bottom-up*) presentano un numero di fibre “efferenti” che sono decine di volte più numerose rispetto alle vie sensoriali “afferenti”²⁶. Ciò significa che per ogni fibra sensoriale ascendente vi sono decine di fibre discendenti in grado di controllare il flusso delle informazioni sensoriali.

8.5 La natura della psiche è immateriale ma non soprannaturale

La natura della mente (psiche) è collegata alle informazioni, e poiché queste sono immate-

²⁵ Seth 2019, p. 48

²⁶ Kandel 2015; Fabbro 2016.



riali (non sono costituite né da massa, né da energia), ne consegue che la mente è immateriale, ma ciò non significa che sia anche soprannaturale. Secondo il filosofo e neuroscienziato tedesco Thomas Metzinger la mente può essere considerata come un “simulatore virtuale della realtà”²⁷. Secondo questa prospettiva il mondo, gli oggetti e l’io stesso sono delle entità virtuali di natura psichica che si sono evoluti all’interno di una data specie per facilitarne la sopravvivenza e la riproduzione. Tuttavia, per il fenomeno della “trasparenza”, il mondo, gli oggetti e l’io vengono sistematicamente scambiati per la realtà.

Ogni specie animale dotata di sistema nervoso complesso elabora un modello mentale (psiche) caratteristico²⁸. Ogni specie possiede un particolare apparato percettivo. In filosofia, è noto l’esempio del mondo percettivo dei pipistrelli, che, non disponendo di recettori visivi organizzano l’esplorazione dell’ambiente mediante l’udito²⁹. Come ha sostenuto il premio Nobel per la medicina François Jacob: “Ogni specie vive in un proprio mondo sensoriale, dal quale le altre specie possono essere parzialmente o total-

²⁷ Metzinger 2009.

²⁸ Jerison 1973.

²⁹ Nagel 1974; Schulte 2012.

mente escluse. [...] Il cervello non funziona registrando una immagine esatta del mondo considerato come una verità metafisica, ma creando la sua propria immagine. Per ogni specie, il mondo esterno così come è percepito dipende sia dagli organi dei sensi che dal modo in cui il cervello integra eventi sensoriali e motori”³⁰.

Non soltanto gli organismi hanno sviluppato un’interfaccia percettiva che è tipica di ogni specie, ma gli esseri viventi più complessi (come gli esseri umani) hanno sviluppato un’interfaccia tipica di ogni individuo (interfaccia utente). Donald Hoffman, nel libro *L'illusione della realtà. Come l'evoluzione ci inganna sul mondo che vediamo* (2020), ha proposto di interpretare tale interfaccia con la metafora del desktop di un computer. In questo modello lo “schermo” corrisponde alle dimensioni spaziali e temporali della percezione, mentre le “icone” rappresentano gli oggetti³¹. Tra lo schermo e le icone, e i sottostanti programmi *software* e le componenti *hardware*, non vi sono che rapporti convenzionali. Alla stessa stregua lo spazio, il tempo e gli oggetti costituiscono delle rappresentazioni simboliche che

³⁰ Jacob 1981, pp. 92-93.

³¹ Hoffman 2020, p. 134.

non si sono evolute per finalità conoscitive ma per permettere agli organismi complessi di muoversi nel mondo, di sopravvivere e riprodursi.

Ovviamente la realtà oggettiva esiste, ma non contempla né dimensioni spaziali o temporali, né tantomeno la presenza di oggetti, come il DNA, i cromosomi, gli organismi, eccetera. Gli oggetti, come le icone del desktop, sono simboli funzionalmente utili, ma che hanno esistenza soltanto nella dimensione mentale. Secondo questa prospettiva le posizioni realiste sostenute da numerosi scienziati e filosofi (come Francis Crick, Albert Einstein e Lee Smolin) rappresentano delle prospettive filosofiche ingenuie, che non tengono sufficientemente conto del ruolo che l'evoluzione ha giocato sullo sviluppo del sistema nervoso, della psiche e dei sistemi percettivi. Infatti secondo Hoffman, il cervello, la mente e i sistemi percettivi si sono evoluti non per conoscere la verità ma per fare figli. Inoltre, non si devono confondere le abilità tecnologiche, come curare le malattie, costruire sistemi informatici e navicelle spaziali, con la capacità di conoscere la realtà oggettiva. Sono due ambiti radicalmente differenti³².

³² Ivi, p. 143.

L'informazione a livello della psiche

La realtà oggettiva è costituita dalla coscienza, cioè dalle interazioni realizzate da reti di *agenti coscienti*, in grado di percepire, decidere, agire³³. La base ontologica della *teoria degli agenti coscienti* sviluppata da Hoffman è costituita dalla condivisione delle coscienze, mentre il tempo, lo spazio, gli elementi della materia, gli organismi, il cervello, la fisica, la biologia, le neuroscienze sono delle componenti emergenti nell'attività di interazione tra gli individui coscienti. L'obiettivo fondamentale di questi individui coscienti è quello di favorire le interazioni e il dialogo critico (attraverso le conoscenze scientifiche, la riflessione filosofica, eccetera) per aumentare la condivisione di "informazioni". In questa prospettiva l'evoluzione degli organismi viventi, della psiche e l'invenzione del linguaggio rappresentano delle tappe nella progressiva automanifestazione della coscienza (teoria del *realismo cosciente*)³⁴.

³³ Ivi, pp. 262-263.

³⁴ Ivi, p. 285.



9. LINGUAGGIO E INFORMAZIONE

Il linguaggio rappresenta una modalità di comunicazione che è tipica della specie umana. Il linguista Daniel Dor ha proposto di considerare il linguaggio come una particolare forma di tecnologia, inventata in maniera inconsapevole, che permette agli esseri umani di condividere i prodotti immaginativi della loro mente¹. Il linguaggio si manifesta attraverso una molteplicità di lingue (e dialetti). Secondo il linguista statunitense Edward Sapir (1884-1939): “Le lingue sono un metodo puramente umano e non istintivo per *comunicare* idee, emozioni e desideri attraverso un sistema di simboli volontariamente prodotti. Questi simboli sono, prima di tutto, uditivi, e sono prodotti dai cosiddetti organi vocali”².

¹ Dor 2015.

² Sapir 1921, p. 8; esistono anche delle “lingue dei segni” che da un punto di vista linguistico presentano la stessa complessità strutturale delle lingue vocali. Le lingue dei segni sono state inventate all’interno delle comunità di individui sordi e invece di utilizzare il canale vocale-uditivo utilizzano il canale gestuale-visivo, cfr. Stokoe 1960; Volterra 2004.

Un aspetto caratteristico del linguaggio è la presenza di un “sistema di simboli”, cioè di un insieme di “segnali acustici”, le parole, che si riferiscono a dei “concetti” (mentali) i quali a loro volta si riferiscono a delle “entità” del mondo reale. Ad esempio, la parola “albero”, un insieme arbitrario di suoni, si riferisce al “concetto” di albero (formato a livello mentale dalla sintesi di numerosi prototipi di alberi). I linguisti hanno osservato che tutte le lingue umane possiedono due caratteristiche generali: a) un canale comunicativo (in genere il canale vocale-uditivo) e b) una doppia articolazione³.

La prima caratteristica del linguaggio consiste nella trasmissione di “informazioni” attraverso il *canale vocale-uditivo*. Quando intendono esprimersi, gli esseri umani producono dei suoni che vengono trasmessi attraverso l'aria fino a raggiungere l'organo uditivo. Esistono anche altre modalità di trasmissione dei messaggi verbali che sono considerati secondari, come ad esempio la scrittura. L'utilizzazione del canale vocale-uditivo per comunicare è un fenomeno molto diffuso in numerose specie animali (in particolare nei vertebrati e negli insetti). Le vocalizzazioni nei vertebrati vengono

³ Fromkin *et al.* 2013.

prodotte mediante tre sistemi: i *polmoni* che forniscono l'“energia” (durante l'espirazione), la *laringe* che costituisce la “sorgente”, e il *tratto vocale sopra-laringeo* che agisce da “filtro” determinando le caratteristiche acustiche del suono⁴.

La seconda caratteristica del linguaggio è la *doppia articolazione*. Tutte le lingue sono organizzate su due piani fondamentali: il primo piano si riferisce alle “parole”, il secondo ai “suoni”. Infatti, tutte le lingue sono composte da parole che combinandosi tra di loro formano un numero quasi infinito di “frasi”, un insieme ordinato di frasi costituisce una “storia”. Il secondo piano riguarda il livello dei suoni, chiamati dai linguisti “fonemi”. Ogni lingua è composta da un numero limitato di fonemi⁵. Si tratta di suoni che non rimandano ad alcun significato ma che combinandosi tra di loro possono formare qualsiasi parola di una lingua. Ad esempio, i suoni [m] e [v] permettono di distinguere due fonemi della lingua italiana, poiché distinguono due parole /m/ela e /v/ela per il resto uguali.

⁴ Borden e Harris 1984.

⁵ Nessuna delle lingue finora studiate ha più di 150 fonemi (il 70% delle lingue contengono in media tra 20 e 37 fonemi), cfr. Fromkin *et al.* 2013.

9.1 La struttura delle lingue

In uno dei suoi ultimi libri il linguista Roman Jakobson (1896-1982) ha sostenuto l'utilità di suddividere i suoni del linguaggio in due categorie: "apri-bocca" (vocali) e "chiudi-bocca" (consonanti). Infatti, le *vocali* sono prodotte mantenendo aperta la cavità orale (per circa 100 millisecondi). Esse costituiscono il "nucleo" delle sillabe. Invece, le *consonanti* sono prodotte mediante una rapida chiusura del tratto vocale, hanno durate inferiori alle vocali (meno di 50 millisecondi) e formano il "margine" delle sillabe. Jakobson ha suggerito che le vocali costituiscono la "materia" dei suoni (come il marmo per uno scultore), mentre le consonanti rappresentano la "forma" di suoni (ossia la pietra che viene tolta dallo scultore per dare forma a una statua). Secondo questa metafora, le consonanti scolpiscono i margini delle vocali delineando la forma finale delle sillabe⁶.

Tutte le lingue presentano un *codice lineare*, che è caratteristico anche del DNA. Ciò significa le espressioni verbali a livello superficiale sono composte da una fila di parole, mentre a livello profondo queste parole

⁶ Jakobson e Waugh 1979.

presentano una struttura nascosta definita sintassi. La linearità costituisce un aspetto fondamentale delle lingue umane, ciò significa che segnali acustici sono disposti lungo una linea del tempo⁷. Un'ulteriore caratteristica delle lingue è il carattere *discreto* (presente anche nel DNA). Come è stato detto, i simboli sonori di una lingua (i fonemi) sono rappresentati da un numero discreto di elementi (in italiano = 30, in inglese = 45). Non esistono lingue con 30,3 fonemi oppure 45,7 fonemi. Lo stesso può dirsi delle parole, infatti in una lingua vi possono essere 20.000 parole ma non 20.000,4 parole. Inoltre, tra una frase composta da “n” parole e una frase composta da “n + 1” parole non esistono frasi intermedie⁸.

Un'ulteriore caratteristica delle lingue è la presenza di una struttura “annidata”. Il livello centrale è costituito dai *fonemi* (vocali e consonanti). Esternamente ai fonemi troviamo le *parole* e, ancora più esternamente, le *frasi*; mentre insieme ordinati di frasi costituiscono lo *strato* più esterno, quello delle *storie*. La sintassi descrive l'organizzazione delle parole all'interno delle frasi; la semantica studia il significato delle parole

⁷ de Saussure 1922, p. 88.

⁸ Moro 2006, p. 74.

e delle frasi; la linguistica testuale analizza l'organizzazione dei testi; e la pragmatica si interessa a come una lingua venga utilizzata in un determinato contesto⁹. Le descrizioni della fonologia e della sintassi sviluppate dai grammatici e dai linguisti rappresentano delle modalità esplicite di descrizione delle lingue¹⁰. Gli studi di neurolinguistica hanno evidenziato che la rappresentazione implicita di questi livelli (fonologico e morfosintattico) è probabilmente molto diversa dalla descrizione sviluppata dai grammatici e dai linguisti¹¹.

La sintassi si riferisce allo studio esplicito di come si combinano le parole all'interno di una frase¹². Edward Sapir ha sottolineato l'enorme diversità nell'organizzazione sintattica delle lingue. Sapir propone di distinguere "lingue analitiche", con un ordine preciso delle parole all'interno delle frasi, dalle "lingue sintetiche", nelle quali l'ordine delle parole riveste una importanza minore.

⁹ de Saussure 1922; Fromkin et al. 2013; Watzlawick et al. 1967; Watzlawick 1977; Andorno 2005.

¹⁰ La "conoscenza esplicita" di un livello linguistico di una lingua si riferisce alla descrizione verbale di tale livello. Ad esempio la grammatica di una lingua (latino, italiano ecc.) è una descrizione esplicita del livello morfosintattico, cfr. Fabbro 1996; Paradis 2009.

¹¹ Paradis 2009; Fabbro 2021a, cap. 12.

¹² Chomsky 1975; 1981.

Ad esempio, in latino (una lingua sintetica) le frasi: “femina hominem videt” e “hominem videt femina” hanno lo stesso significato (la donna vede l’uomo), con piccole differenze stilistiche e retoriche. Al contrario in italiano le frasi “l’uomo mangiò il pollo” e “il pollo mangiò l’uomo” hanno significati completamente diversi, per questa ragione l’italiano è una lingua analitica. Nelle lingue analitiche le frasi possiedono un’importanza primaria, mentre nelle lingue sintetiche le parole tendono ad assumere una gamma di significati maggiore. Si è inoltre osservato che la struttura grammaticale di una lingua (ad esempio la frequenza delle frasi principali e secondarie) è influenzata dal numero dei parlanti e dalla presenza della scrittura¹³.

Infine, una caratteristica molto significativa delle lingue umane è costituita dalla *ricorsività*, ovvero dalla capacità di reiterare un processo all’interno della struttura. Dato che una frase è costituita da un sintagma nominale (SN) più un sintagma verbale (SV) [$F = SN + SV$], e il sintagma verbale può essere costituito da un verbo più un sintagma nominale oppure da un verbo più un’altra frase [$SV = V + SN$ oppure $SV = V + F$] è possibile espandere in maniera

¹³ Martinet 1985; Deutscher 2010, pp. 138-145.

ricorsiva una frase mediante l'inserimento di una seconda frase a livello del sintagma verbale. Ad esempio, “Marco indossa uno smoking” + “Lo smoking è costato 500 euro” = “Marco indossa uno smoking che è costato 500 euro”. La ricorsività rende conto di un'ulteriore caratteristica delle lingue: l'*apertura*, cioè la capacità di produrre frasi sempre nuove.

9.2 *L'origine del linguaggio*

Molti libri e articoli sono stati dedicati all'origine del linguaggio. Gli ultimi studi di paleoantropologia, linguistica e genetica indicano che non vi è stata alcuna evoluzione del linguaggio. Si ha ragione di credere che questo sistema di “comunicazione” si sia originato in maniera improvvisa, probabilmente nell'arco di qualche generazione meno di 100 mila anni fa¹⁴. Invece è molto probabile che la danza e il canto (glossolalico) si siano evoluti molto prima dell'invenzione del linguaggio articolato, cioè nell'arco di alcuni milioni di anni¹⁵.

¹⁴ Tattersall 2012; Atkinson 2011; Lieberman 2013.

¹⁵ Mehr *et al.* 2019.

Gli esseri umani moderni (*Homo sapiens*) sono comparsi in Africa circa 300.000 anni fa. I paleoantropologi hanno documentato la comparsa di una rivoluzione cognitiva circa 80.000 anni fa¹⁶. Tale rivoluzione è attestata da un'improvvisa espansione della produzione di una grande varietà di utensili (in vari materiali), insieme alla realizzazione di nuovi tipi di ornamenti e oggetti simbolici. Il primo esempio di raffigurazione simbolica è rappresentato da una lastra di ossido di ferro proveniente da una grotta in Sudafrica, che riporta una serie di incisioni geometriche datate più di 70.000 anni fa. Nello stesso periodo *H. sapiens* ha inventato l'arco munito di frecce con la punta di pietra (spesso potenziate dall'uso di specifici veleni)¹⁷. Secondo i paleoantropologi la realizzazione di questa enorme varietà di prodotti è stata possibile grazie alla presenza di un linguaggio articolato simile al nostro.

Quindi *Homo sapiens* per più di 200.000 anni non ha utilizzato alcun linguaggio articolato. Ciò significa che l'invenzione del linguaggio è stata resa possibile da un fenomeno di "riciclaggio neuronale". Secondo que-

¹⁶ Corballis 2002, p. 188; Tattersall 2012, p. 238; Lieberman 2013, pp. 176-177; Chomsky 2016, p. 51.

¹⁷ Marean 2015, p. 40; Wadley *et al.* 2011.

sto fenomeno alcune strutture del cervello (come ad esempio i gangli della base, l'area di Broca e l'area di Wernicke dell'emisfero cerebrale sinistro) che si sono originariamente evolute per svolgere alcune specifiche funzioni cognitivo-motorie (coordinazione di sequenze del movimento, percezione uditiva, produzione del canto glossolalico) sono state cooptate per sostenere nuove funzioni come quelle del linguaggio (processo definito di *exadattamento*). Un ulteriore esempio di riciclaggio neuronale ha riguardato l'organizzazione neuronale dei processi di letto-scrittura¹⁸. Poiché la scrittura è stata inventata alcune migliaia di anni fa, essa deve essere rappresentata nel cervello in strutture neurali che si sono evolute per svolgere altre funzioni. È probabile che lo stesso sia accaduto per il linguaggio articolato.

Alcuni studi di paleoantropologia indicano che il linguaggio articolato è stato probabilmente inventato in una regione sud-orientale dell'Africa¹⁹. Con molta probabilità si è trattato di un'invenzione inconsapevole, realizzata da un gruppo di bambini²⁰.

¹⁸ Dehaene e Cohen 2007; Dehaene 2009.

¹⁹ Rosenfield 1992, pp. 144-147; Tattersall 2012, pp. 242-244; Fabbro 2018, pp. 24-38.

²⁰ Pinker 1994; Dunbar 2014; Corballis 2002; 2017, p. 205.

Questa invenzione è accaduta diverse volte nella storia umana. Due di queste occasioni sono state studiate dalla fine del secolo scorso dai linguisti, una in Nicaragua e una in una comunità di beduini nel deserto del Negev²¹. La lingua nicaraguense dei segni è la prima lingua inventata da un gruppo di bambini a essere stata studiata in maniera accurata²². Un elemento critico è rappresentato dal numero di bambini necessario per inventare una lingua dal nulla. Si è potuto documentare che sono necessarie almeno due generazioni e alcune centinaia di bambini per generazione²³.

L'invenzione di una lingua (nel deserto del Negev e in Nicaragua) ha permesso di comprendere che l'origine del linguaggio è un fenomeno "tutto o nulla". Il linguaggio, la scrittura e il calcolo sono comparsi in maniera improvvisa. Si tratta di tecnologie inventate in un determinato momento della storia umana. Ciò che si è evoluto sono i prerequisiti che rendono possibile la rappresentazione di queste complesse funzioni a livello del sistema nervoso umano, cioè: il canto glossolalico (per il linguaggio), l'abili-

²¹ Senghas *et al.* 2004; Senghas 2005.

²² Bausani 1974; Fabbro 1996.

²³ Senghas 2005, p. 464.



tà di discriminare le forme (per la lettura), di eseguire movimenti fini con le dita (per la scrittura) e la cognizione spaziale (per il calcolo). L'invenzione del linguaggio può essere considerata come la più importante forma di tecnologia sociale umana²⁴. Il linguaggio è stato considerato come l'*istituzione sociale fondamentale* sulla quale si fondano tutte le altre istituzioni umane²⁵.

9.3. Linguaggio, memoria e coscienza

La memoria, il linguaggio e la coscienza sono funzioni strettamente intrecciate. Gli studi di neuroscienze hanno suddiviso la memoria umana in tre componenti principali: la memoria a breve termine, la memoria a lungo termine implicita ed esplicita²⁶. Come è stato accennato (cap. 4), la memorizzazione di informazioni è un argomento di studio dalla teoria della comunicazione [poiché la memoria ha a che vedere con il trasporto di informazioni sulla linea del tempo, cioè dal punto A (passato) al punto B (presente)]. Per memorizzare un'informazione il sistema

²⁴ Dor 2015.

²⁵ Searle 2019, pp. 233-237.

²⁶ Schacter 1996; Baddeley *et al.* 2011.



deve essere in grado: I) di acquisire (codificare), II) conservare (in maniera sufficientemente fedele e per un determinato periodo di tempo), e III) recuperare (ricostruire) le informazioni immagazzinate.

Gli studi di neuroscienze della memoria hanno permesso di distinguere due sistemi generali della memoria a lungo termine: a) i sistemi della memoria implicita (non dichiarativa) e b) i sistemi della memoria esplicita (dichiarativa). La “memoria implicita è coinvolta nell’appropriazione di competenze: I) non-consce, che cioè non richiedono un elevato livello di coscienza e di attenzione per essere apprese; e II) non-dichiarative, non solo l’appropriazione di queste competenze è indipendente dalla presenza del linguaggio, ma è impossibile descrivere verbalmente questi sistemi (sono opachi alla introspezione verbale). Ciò significa che la descrizione verbale di questi sistemi non corrisponde a come stanno realmente le cose.

I sistemi della memoria implicita sono diffusi in numerose specie animali. Sono state descritte molte forme di memoria implicita, tra cui: l’abituazione, la sensibilizzazione, i riflessi condizionati, l’apprendimento per prove ed errori, il *priming* ecc. Una delle forme di memoria implicita più importanti e più diffuse nelle diverse specie dei verte-

brati è la “memoria procedurale”. In questo tipo di memoria – presente anche negli esseri umani – l'apprendimento avviene senza consapevolezza, attraverso la ripetizione di procedure, come: camminare, guidare l'automobile, suonare uno strumento musicale e parlare (livelli fonologico e morfosintattico).

Come è stato detto, le conoscenze procedurali acquisite (ad esempio ascoltare e ripetere i suoni del linguaggio, le parole e le frasi) non sono accessibili all'introspezione verbale. La descrizione verbale di queste procedure e la conoscenza di queste descrizioni verbali (ad esempio la descrizione della fonologia oppure della grammatica di una lingua) non permette di acquisire alcuna conoscenza procedurale relativa alla lingua stessa. Conoscere bene la grammatica della lingua finlandese non significa saper parlare bene il finlandese. Un professore universitario di lingua aramaica può conoscere la grammatica di tale lingua ma non essere in grado di parlarla. Invece, un bambino siriano di sei anni può parlare l'aramaico senza conoscere alcuna grammatica.

Le conoscenze implicite (di una lingua, di uno strumento musicale, di uno sport) sono estremamente complesse e inaccessibili alla descrizione verbale. Esse assomigliano alle conoscenze che i sistemi di *machine*

learning sviluppano all'interno della loro "scatola nera". In entrambi i casi estese reti neurali (biologiche nel caso della memoria implicita, informatiche nel caso delle reti neurali) si modificano in maniera costante e progressiva fino a raggiungere gli obiettivi stabiliti. Ciò che accade all'interno di questi sistemi è estremamente complesso da poter essere descritto in maniera verbale (o razionale). Questi sistemi ci permettono di raggiungere degli obiettivi senza che gli esseri umani riescano a essere consapevoli di come questi obiettivi siano raggiunti. Ad esempio quali strutture del mio cervelletto destro (dei gangli della base dell'emisfero sinistro, dell'area di Broca e di Wernicke) si sono attivate durante la produzione di una determinata frase e perché?

I sistemi della "memoria esplicita", suddivisi in memoria semantica e in memoria episodica, sono in relazione sia con il linguaggio sia con la memoria²⁷. La memoria semantica ci permette di accedere in maniera consapevole alle conoscenze semantiche. Negli esseri umani, e in molte altre specie di vertebrati (mammiferi e uccelli), queste conoscenze sono organizzate in sistemi mentali che prevedono l'esistenza di un

²⁷ Tulving 1985; 2005.

“contesto” (il mondo) dove sono presenti degli “oggetti”, i quali possono essere raggruppati secondo categorie concettuali²⁸. La percezione di un mondo in cui sono situati degli oggetti disposti in un contesto spaziale non significa necessariamente che l'universo abbia questa struttura ma si tratta probabilmente dell'unico modo in cui i vertebrati sono in grado di percepirlo²⁹. La memoria semantica consente di riconoscere gli ambienti, gli oggetti e le persone, senza tuttavia ricordare “dove”, “come” e “quando” si sono verificate le esperienze che hanno dato luogo all'apprendimento. Ad esempio, io so che Atene è la capitale della Grecia, ma non ricordo il giorno e il luogo in cui ho appreso questa informazione. Alla stessa stregua la mia gattina mi riconosce immediatamente quando entro nel cortile di casa e per questo si avvicina, ma non credo si ricordi quando ci siamo incontrati la prima volta. La rappresentazione neuronale della memoria semantica coinvolge l'ippocampo ed estese aree corticali del lobo frontale, parietale e temporale³⁰.

²⁸ Godfrey-Smith 2016; Zentall *et. al.* 2014; Murray *et al.* 2018.

²⁹ Jerison 1973; Pilley e Reid 2011; Rogers 2017; Musser 2019, p. 36.

³⁰ Duff *et al.* 2020.

9.4 Il linguaggio e il tempo

La “memoria episodica” è collegata con la *consapevolezza del tempo* e con una forma del tutto nuova di coscienza chiamata “autocoscienza fenomenica”³¹. La memoria episodica è sempre collegata a un evento (che cosa), che si è svolto in un luogo (dove) e in un particolare tempo (quando). Inoltre, le informazioni della memoria episodica sono sempre in relazione con un sé (soggetto) dotato a livello mentale di una “linea del tempo”. Per ricordare un “evento” del passato (come esperienza multisensoriale) è necessario “ricostruire” nel momento presente una scena (multisensoriale) del passato³². Per fare questo è necessario distinguere la “scena presente” (coscienza del momento presente) (T2) dalla “scena passata” (T1) e riuscire a porre questi due eventi su una linea del tempo immaginaria³³. La memoria episodica coinvolge un sistema molto complesso di operazioni cognitive che si basano sull’elaborazione di diversi livelli della coscienza (coscienza del presente, coscienza del passato, coscienza di sé, linea del tempo, osservazione e monitoraggio dei diversi livelli).

³¹ Revonsuo 2006; 2010.

³² Tulving 2005, p. 15.

³³ Fabbro 2018.

Gli studi di neuropsicologia hanno evidenziato che i sistemi della memoria semantica sono correlati alla capacità di immaginare luoghi e oggetti; mentre la memoria episodica è in relazione con la capacità di “viaggiare mentalmente nel tempo” (*Mental Time Travel*)³⁴. Numerose specie di vertebrati (in particolare mammiferi e uccelli) presentano la capacità di viaggiare mentalmente nel tempo, cioè di elaborare delle costruzioni immaginative della realtà situandola nel futuro. Tale capacità si è sviluppata in maniera molto estesa negli ominidi e in particolare negli esseri umani, in ragione della maggiore complessità delle strutture nervose (in particolare del lobo frontale) e per quanto riguarda gli esseri umani della presenza dell'autocoscienza e del linguaggio³⁵.

La capacità di viaggiare mentalmente nel tempo ha permesso ad alcune specie di ominidi lo sviluppo della tecnologia, ossia la capacità di produrre e conservare in maniera sistematica degli strumenti specificatamente finalizzati alla realizzazione di scopi. Come è stato accennato, le capacità tecnologiche di alcune specie di ominidi si pongono a un livello che non è stato ancora eguagliato da

³⁴ Corballis 2015.

³⁵ *Ibid.*

nessuna altra specie animale. Tali capacità hanno subito un'esplosione creativa nel periodo della rivoluzione cognitiva, associata all'invenzione del linguaggio (§ 9.2). Esiste quindi la probabilità che la capacità di viaggiare mentalmente nel tempo e la memoria episodica siano state potenziate in maniera notevole dalla facoltà del linguaggio³⁶. Si tratta di un'ipotesi sostenuta dal filosofo e neuroscienziato francese Pierre Janet (1859-1947), secondo cui è stato il linguaggio a determinare l'origine e lo sviluppo della memoria episodica negli esseri umani³⁷.

Secondo Pierre Janet, attraverso la *narrazione di storie* gli esseri umani sono stati in grado di raccontare gli avvenimenti accaduti e di elaborare l'idea del "passato". Infatti, è noto che una delle capacità del linguaggio riguarda la possibilità di parlare delle cose "assenti". La sera accanto al fuoco dell'accampamento, è possibile raccontare le vicende accadute durante la giornata, oppure ricordare episodi o persone collegate a vicende del passato. Oltre ai resoconti di esperienze passate l'invenzione del linguaggio ha dato origine alla possibilità di elaborare racconti frutto di fantasia (miti). Nel racconto di storie

³⁶ Ginsburg e Jablonka 2014.

³⁷ Janet 1928; Minkowski 1933.

fantastiche il prima e il dopo si intersecano senza sosta. Per tale ragione gli esseri umani hanno dovuto introdurre un punto fermo, un limite per distinguere il passato dal futuro, per questa ragione – secondo Janet – si è sviluppata l'idea del “presente”.

Un'ulteriore capacità cognitiva sviluppata dagli umani consiste nella abilità di “viaggiare nella mente delle altre persone” definita *teoria della mente*³⁸. Gli esseri umani sono particolarmente interessati a conoscere (immaginare) quello che gli altri esseri umani pensano. Una capacità molto meno presente negli individui affetti dall'autismo. Le società umane funzionano in maniera così complessa proprio perché esistono capacità cognitive che ci permettono di immaginare mentalmente il futuro, di fare delle simulazioni mentali riguardo a ciò che pensano o faranno gli altri esseri umani.

Secondo questa prospettiva le competenze neuropsicologiche (sistemi mentali per viaggiare nel tempo, teoria della mente, attenzione congiunta ecc.) e quelle culturali (linguaggio, narrazioni, linea del tempo) si sono intrecciate per realizzare le caratteristiche mentali più tipiche degli esseri umani, ossia la memoria episodica e l'autocoscienza. Ciò si-

³⁸ Tomasello 2014.

gnifica che le caratteristiche neurobiologiche e cognitive rappresentano delle competenze necessarie ma non sufficienti per riuscire a sviluppare gli aspetti più complessi della cognizione umana, aspetti collegati in maniera stretta con il linguaggio e con i rapporti che questa facoltà determina tra le persone e gli oggetti disposti nello spazio e nel tempo.

Pur essendo il tempo una componente fondamentale della coscienza e del linguaggio (si pensi al tempo dei verbi), non vi è nulla di più enigmatico di questa dimensione, sia per la scienza che per la filosofia³⁹. Grazie alla capacità di viaggiare mentalmente nel tempo, all'autocoscienza e al linguaggio gli esseri umani possono immaginare la loro fine. Si ha ragione di credere che nessun altro organismo vivente sia in grado di immaginare la propria morte. Come ha sostenuto il filosofo tedesco Martin Heidegger (1889-1976): "I mortali sono coloro che possono fare esperienza della morte come morire. L'animale non lo può. Ma l'animale non può nemmeno parlare. La relazione essenziale fra la morte e il linguaggio appare come un lampo, ma è ancora impensata"⁴⁰.

³⁹ Klein 2007; Smolin 2013, Rovelli 2017.

⁴⁰ Heidegger 1957-1958, p. 169; cfr. Agamben 2008, p. 3.

9.5 Pensiero e linguaggio

Durante il giorno la nostra mente è impegnata a elaborare dialoghi interiori, fantasie, sogni a occhi aperti ed emozioni. A questo flusso, più o meno controllato, di idee viene dato il nome di “pensiero”⁴¹. Nella sua concezione più ampia il pensiero è una sorta di esperienza multimediale (fatta di parole, immagini, suoni ecc.). Tuttavia, fin dall'antichità, l'attività di pensare è stata collegata prevalentemente con il linguaggio. Per Aristotele (384-322 a.C.), la componente razionale della psiche è collegata al linguaggio⁴². Sulla stessa linea pensiero era Tommaso d'Aquino (1225-1274) che ha definito il pensiero come una “parola interiore”⁴³. E per René Descartes (1596-1650), la *res cogitans* si articola nel linguaggio, per questo motivo egli ha posto a fondamento della sua filosofia la frase: “Je pense, donc je suis” (Io penso dunque sono)⁴⁴.

Le prime ricerche di natura psicologica riguardanti i rapporti tra il *pensiero* e il *linguaggio* sono state condotte nella prima

⁴¹ Dewey 1910, p. 4.

⁴² Aristotele, *De Anima*, III (I) 3, 427a-b e 428a-b.

⁴³ Tommaso d'Aquino, *La somma teologica*, vol. 1, par. 1, Quest. 93, Art. 7, p. 847.

⁴⁴ Descartes 1636, p. 14.

metà dello scorso secolo dallo psicologo russo Lev Vygotskij (1896-1934). Secondo Vygotskij il pensiero si origina nel bambino dalla interiorizzazione del linguaggio⁴⁵. Il filosofo John Dewey (1859-1952) ha dedicato un libro al pensiero, un'attività nella quale le idee sono disposte secondo "un ordine consecutivo tale che ognuna di esse determini la successiva come il suo proprio risultato e, a sua volta, ciascun risultato si appoggi o si riferisca a quelli che lo precedono"⁴⁶. Secondo questo filosofo, l'attività di pensare è finalizzata al raggiungimento di obiettivi specifici, come: chiarire qualcosa di oscuro, riconoscere un'ambiguità o risolvere un problema.

Più recentemente si è sviluppata una vera e propria corrente di ricerca sperimentale sulle caratteristiche fenomenologiche e neuropsicologiche del pensiero⁴⁷. Secondo questo approccio il pensiero viene considerato come un "flusso di coscienza" caratterizzato da sensazioni, idee ed enunciati interiori. Tuttavia, una delle manifestazioni principali del pensiero è il "linguaggio interiore". Si tratta di una componente co-

⁴⁵ Vygotskij 1934, p. 387.

⁴⁶ Dewey 1910, pp. 4-5.

⁴⁷ Fernyhough 2016.

gnitiva che connette le altre, ossia: le funzioni esecutive, il sistema per viaggiare nel tempo, la lettura della mente, il dispositivo che determina il vagabondare con la mente (*mind wandering*) e il sistema di sognare a occhi aperti (*day dreaming*). Secondo lo psicologo inglese Charles Fernyhough il linguaggio interiore è in grado di “controllare, dirigere, elaborare fantasie e sognare altre realtà”⁴⁸.

Per lungo tempo il ragionamento riflessivo e la logica hanno costituito i fondamenti del pensiero filosofico⁴⁹. Si tratta di un metodo di lavoro “necessario” ma, purtroppo, non “sufficiente”. La conoscenza e l'autentica riflessione filosofica non avanzano a suon di argomentazioni ben formate o di sillogismi logici. E neppure attraverso conoscenza e/o l'utilizzazione, anche se molto approfondita, dei giochi linguistici che gli esseri umani sono così bravi a inventare e gestire. La conoscenza e la riflessione critica avanzano mediante il confronto costante tra le molteplici discipline che caratterizzano la vita e gli ambiti della conoscenza umanistica, artistica, scientifica e filosofica, integrate con l'osservazione

⁴⁸ Ivi, p. 224.

⁴⁹ Evans 2017, p. 14.

e la sperimentazione. La conoscenza e la riflessione necessitano di ordine, di procedimenti logici e matematici e di buone argomentazioni, ma non si esauriscono su di essi. Infatti, una larga parte delle conoscenze di un individuo dipende dalle sue esperienze, non ultime quelle relative alla coscienza fenomenica.

È noto che il pensiero è – entro certi limiti – indipendente dal linguaggio. Come è stato detto gli esseri umani (*H. sapiens*) per più di 200.000 anni della loro storia non hanno conosciuto il linguaggio. Ciò non significa che durante questo periodo non abbiano pensato. Alla stessa stregua si è potuto evidenziare che le persone sordomute che non hanno acquisito alcun linguaggio (*languageless person*) sono in grado di pensare e anche di raccontare eventi capitati durante la giornata mediante forme di comunicazione gestuale⁵⁰. Lo studio di un caso neurologico, capitato a un direttore di una rivista teologica, colpito da un'afasia completa durata alcune ore, ha permesso di documentare che è possibile pensare, anche in maniera complessa, senza il linguaggio⁵¹.

⁵⁰ Schaller 1991.

⁵¹ Lecours e Joannette 1980.

9.6 Le funzioni del linguaggio

Aristotele è stato il primo filosofo a sostenere che gli esseri umani sono gli unici organismi sociali dotati di parola⁵². In un passo del *De interpretatione* Aristotele ha sostenuto con chiarezza che le parole articolate sono “simboli” delle affezioni dell’anima, come le parole scritte sono “simboli” di quelle vocali⁵³. Attraverso il sistema simbolico del linguaggio, gli esseri umani riescono a costruire una comunità nella quale sono possibili il dialogo e la condivisione di argomentazioni e ragionamenti (ossia di sviluppare una serie di opinioni condivise e una conoscenza critica di natura intersoggettiva)⁵⁴.

La possibilità di utilizzare il linguaggio come uno strumento in grado di favorire il ragionamento attraverso il dialogo e l’elaborazione di processi decisionali condivisi è stata uno dei punti di forza del pensiero umano⁵⁵. Questo processo si è diffuso storicamente nella Grecia antica, attraverso il

⁵² Aristotele, *Politica*, 1253a, 9-30; Lo Piparo 2003, p. 88.

⁵³ Aristotele, *De interpretatione*, 16a, 3-8; Lo Piparo 2003, p. 42 ss.

⁵⁴ Aristotele, *Etica Nicomachea*, 1170b, 10-14; Lo Piparo 2003, p. 29.

⁵⁵ Tomasello 2014, pp. 148-149.

superamento di una concezione più arcaica nella quale prevaleva l'idea che la "verità" coincidesse con l'espressione verbale delle persone dotate di potere (re, giudici e sacerdoti)⁵⁶. Una prospettiva che purtroppo ha funestato a lungo il pensiero religioso e politico di numerose culture del Vicino Oriente⁵⁷.

L'enorme possibilità che il linguaggio offre come strumento per esprimere opinioni differenti in modo da raggiungere un punto di vista intersoggettivo e, quindi, per riuscire a perfezionare le decisioni e le azioni ha fatto perdere di vista i suoi limiti. Nella filosofia greca antica si è iniziato a credere che il mondo fosse governato da una logica simile a quella del linguaggio. Si è diffusa l'idea che il linguaggio rappresenti un'immagine del mondo⁵⁸. La concezione che il linguaggio e la logica rispecchino l'organizzazione del mondo ha introdotto l'imbarazzante nozione di *verità* all'interno dei percorsi di conoscenza.

Essendo il linguaggio una tecnologia per la condivisione dell'immaginazione la sua presa sul mondo è scivolosa⁵⁹. Per gli esseri

⁵⁶ Detienne 1969.

⁵⁷ Liverani 1988; Garbini 2001.

⁵⁸ Mazzone 2005, pp. 150-151.

⁵⁹ Scott-Phillips 2015; Fabbro 2021a, b.

umani è molto difficile vivere in un mondo incerto e privo di ordine. Per questo motivo numerosi filosofi, a partire da Aristotele fino a Kurt Gödel (1906-1978), hanno cercato di delimitare la complessità del mondo fisico, biologico e psichico all'interno di enunciati che potevano essere "veri" o "falsi", dimenticando che la nozione di verità ha senso soltanto nell'ambito delle interazioni umane⁶⁰. Infatti, soltanto gli esseri umani possono dire la verità o mentire. Per questa ragione la scienza ha rinunciato al tentativo di definire una teoria scientifica come "vera", accontentandosi di cercare la "migliore" teoria scientifica a disposizione, che può essere sostituita attraverso osservazioni o esperimenti che la possono confutare⁶¹.

L'invenzione del linguaggio e la costruzione di comunità linguistiche (e immaginative) ha permesso agli umani di uscire da una condizione di estrema "solitudine mentale" per entrare in una vita partecipativa. La condivisione di pensieri, emozioni e storie ha permesso la realizzazione di numerose comunità culturali. Tuttavia, come ha sottolineato Nassim Taleb, l'abitudine di raccontare storie, che permettono di intrav-

⁶⁰ Foucault 1983; Fabbro 2024.

⁶¹ Popper 1959; 1985.

vedere un senso negli accadimenti del mondo, semplifica in maniera spesso erronea la complessità del mondo reale. Il dominio del linguaggio e le storie ci inducono a cadere in una condizione definita come *fallacia narrativa*⁶². Si tratta di una tendenza sistematica a semplificare, a intravedere ordine e senso anche dove non vi sono.

Un ulteriore limite di questa visione è costituito dall'illusione analgesica della causalità, ovvero dalla credenza che "tutto" quanto accade abbia una causa identificabile; quindi, tra le multiformi possibilità viene scelta la causa che sembra essere più evidente, in modo da credere di essere riusciti ad avere una spiegazione chiara di quello che accade. Due psicologi israeliani, Daniel Kahneman (1934-2024) e Amos Tversky (1937-1996), hanno mostrato che gli esseri umani hanno la tendenza a utilizzare il ragionamento logico-verbale in modo da poter confermare le loro idee piuttosto che per cercare di scoprire e correggere i propri errori⁶³. L'elaborazione di un pensiero critico costa molta attenzione e fatica soprattutto se è volto a evidenziare e a evitare i trabocchetti insiti nel ragionamento verbale. Per questo motivo, come ha

⁶² Taleb 2007.

⁶³ Lewis 2017.

sostenuto Ludwig Wittgenstein, il lavoro filosofico è costantemente “in lotta con il linguaggio”⁶⁴.

Un'attenzione particolare deve essere riservata alle reali finalità che spingono una persona a parlare⁶⁵. Dobbiamo essere in grado di chiederci per quale ragione un individuo sta parlando (incluso noi stessi). È noto che i mammiferi comunicano per stabilire relazioni. Il piccolo gatto miagola per attirare l'attenzione della madre. Quando è grande miagola per attirare l'attenzione del padrone (affinché gli fornisca dell'acqua, delle crocchette oppure lo faccia uscire di casa). Così numerosi comportamenti (posture del corpo, gesti, espressioni vocali) presenti nelle specie di mammiferi sociali (ad es. primati) sono di natura relazionale.

Attraverso il comportamento comunicativo, numerose specie di mammiferi sociali cercano di stabilire e/o regolare delle relazioni (di affiliazione, di dominanza oppure di sottomissione). Soltanto gli esseri umani sono stati in grado di sviluppare un linguaggio articolato che non è primariamente interessato alla dimensione relazionale, quanto piuttosto alle capacità operative e costrutti-

⁶⁴ Wittgenstein 1914-1951, p. 35.

⁶⁵ Bateson 1972, pp. 400-415.

ve, poiché – come ha sostenuto l'antropologo francese André Leroi-Gourhan (1911-1986) – l'attività del linguaggio e quella della mano sono strettamente collegate⁶⁶. Tuttavia, gli esseri umani rimangono dei mammiferi sociali, se “tradiscono” la loro umanità, ecco che il linguaggio, da “strumento” operativo dotato di finalità costruttive, viene declassato a un mero “sistema di comunicazione” atto a stabilire relazioni (dominanza, subordinazione, relazioni sessuali, eccetera). Se intervengo a un seminario scientifico o filosofico ciò che conta non è l'impressione favorevole o meno che ho esercitato sui partecipanti, ma piuttosto il contributo che ho fornito allo sviluppo della conoscenza critica.

9.7 Informazione e linguaggio

Sappiamo che il linguaggio è una tecnologia sviluppata dagli umani per riuscire a condividere i prodotti immaginativi della loro mente. Per parlare di linguaggio è necessario avere a che fare con esseri umani, cioè con degli organismi biologici multicellulari, dotati di un sistema nervoso molto comples-

⁶⁶ Leroi-Gourhan 1964; 1965.

so, in grado di realizzare una dimensione psichica caratteristica (attenzione congiunta, teoria della mente), inseriti in un contesto storico-sociale ed educativo particolare (come la deambulazione bipede, il linguaggio viene appreso dai bambini all'interno di contesti sociali e relazionali opportuni). Per quanto sappiamo, nella natura non esistono lingue se non quelle parlate dagli esseri umani (Cantone e Fabbro 2025). Anche le lingue espresse dalle macchine, mediante i sistemi di intelligenza artificiale generativa non avrebbero alcun senso in assenza di esseri umani.

Un ulteriore esempio di come l'informazione necessiti di supporti fisici (carta, inchiostro, lettere, parole, eccetera) ma sia "situata al di là della fisica" è rappresentato dalla *Divina Commedia* (e da tutte le raccolte di poesie o romanzi presenti nella letteratura mondiale). Se contiamo le parole che la compongono, vediamo che essa è formata da 101.698 parole e da 408.476 lettere. Ora possiamo immaginare di ritagliare tutte le lettere della *Divina Commedia* e di mettere ciascuna in uno dei ventuno contenitori che rappresentano le lettere della lingua italiana (il cestino con la lettera A, la lettera B, la lettera C, la lettera D e così via). Quando avremo disposto tutte le 408.476 lettere che

compongono il poema nei ventuno cestini avremo la stessa materia e la stessa energia del grande poema composto da Dante Alighieri (1265-1321), ma non avremo più la *Divina Commedia*. L'informazione in essa contenuta è rappresentata dall'ordine preciso ed estremamente improbabile della sequenza assunta dalle lettere nella *Divina Commedia*.

L'informazione del linguaggio è quindi rappresentata dall'ordine che assumono i fonemi, le parole e le frasi. Secondo il biologo molecolare Françoise Jacob in natura si sono verificate due svolte decisive nell'evoluzione di sistemi simbolici doppiamente strutturati: l'emergenza della vita e l'invenzione del linguaggio⁶⁷. "Fra tutti i sistemi informativi, il codice genetico è il solo che condivide con quello verbale una dislocazione sequenziale di sotto-unità discrete – i fonemi nella lingua e i nucleotidi (lettere nucleiche) nel codice genetico – che di per sé sono prive di significato ma che servono a costruire unità minime provviste del loro specifico e intrinseco significato"⁶⁸.

Ciò che accomuna il codice genetico e il linguaggio è la costruzione di sistemi

⁶⁷ Jacob 1970.

⁶⁸ Jakobson e Waugh 1979, p. 70.

ordinati di natura simbolica e combinatoria. In entrambi i sistemi “qualcosa”, una tripletta di nucleotidi o una parola, si riferisce a “qualcos’altro”, ossia a un amminoacido o a un concetto. Se questo ragionamento è corretto, allora è possibile sostenere che nella natura si sono verificate non due “svolte” ma tre: 1) la prima svolta ha riguardato l’evoluzione del “codice genetico” (DNA e sua traduzione in proteine) (capitata più di 4 miliardi di anni fa), 2) la seconda ha riguardato l’invenzione del “codice linguistico” (capitata meno di 100.000 anni fa) e 3) la terza ha determinato lo “sviluppo della psiche” (circa mezzo miliardo di anni fa).

Mentre il codice genetico e la psiche rappresentano due tappe che si sono sviluppate per selezione naturale delle specie, il linguaggio costituisce un sistema simbolico che è stato “inventato” dagli esseri umani. Ogni gradino di elevazione del sistema simbolico ha determinato un cambiamento radicale della situazione precedente. Il codice genetico ha reso possibile la vita. L’attività psichica ha determinato lo sviluppo delle capacità cognitive. L’invenzione del linguaggio ha determinato una enorme amplificazione delle relazioni sociali, della conoscenza condivisa insieme all’emersione di capacità

del tutto nuove, come quelle di natura etica (cioè la capacità di scegliere di compiere azioni malvage oppure di lavorare a favore della promozione del bene).

9.8 Il linguaggio come l'alfa e l'omega della condizione umana

Il linguaggio è uno dei prodotti più enigmatici e più sconcertanti realizzati dagli esseri umani. Si tratta come è stato detto di una tecnologia atta a suscitare (e quindi a condividere) dei prodotti immaginativi della mente⁶⁹. Come tutte le tecnologie, e forse più di tutte le altre, il linguaggio è dotato di una vita propria, è cioè parzialmente indipendente dai suoi inventori-fruitori. Come ha sostenuto Martin Heidegger “il linguaggio parla”⁷⁰. Tuttavia, agli esseri umani è data la facoltà di fermarsi, cioè di rifiutare di esprimersi intorno ad argomenti sui quali – come ha sostenuto Wittgenstein – è meglio tacere⁷¹. A questo proposito, le neuroscienze hanno mostrato che la forma più difficile di movimento è proprio quella di riuscire –

⁶⁹ Dor 2015; Cantone e Fabbro 2025.

⁷⁰ Heidegger 1950, p. 28.

⁷¹ Wittgenstein 1921, proposizione n. 7.

mediante uno sforzo volontario – a inibire un movimento. L'inibizione e l'autocontrollo sono, infatti, funzioni elaborate della struttura più complessa del cervello umano, il lobo prefrontale⁷².

Le argomentazioni sviluppate attraverso il linguaggio, come quelle presenti in questo libro, costituiscono un insieme di informazioni. Infatti, ogni parola di una lingua è una fonte di informazione, possiede un lato materiale, cioè l'insieme dei suoni che la compongono, oppure l'insieme dei circuiti nervosi e delle attivazioni neurofisiologiche che permettono la sua produzione o comprensione, e un lato non materiale, che si riferisce alla generazione di prodotti immaginativi nella mente di chi produce la parola e di chi l'ascolta. Lo stesso discorso, ma in maniera molto più complessa e articolata, può essere esteso alle frasi, ai discorsi, fino alle storie. Oltre alle dimensioni del linguaggio studiate dalla linguistica classica (fonetica, fonologia, morfosintassi, semantica) il linguaggio presenta degli aspetti pragmatici molto importanti. Uno degli aspetti della pragmatica più interessanti si riferisce all'analisi delle caratteristiche e delle funzioni delle metafore.

⁷² Luria 1973; Fabbro 2016; 2024.

Diversi studi di filosofia della scienza hanno analizzato il ruolo che le metafore svolgono nell'ambito della scienza⁷³. Si è potuto constatare che lo sviluppo del sapere scientifico è stato influenzato da alcune metafore. Tuttavia, ciò che deve essere tematizzato in maniera più fondamentale è il ruolo che il linguaggio ha avuto nella elaborazione del pensiero scientifico e filosofico. È possibile sostenere che in assenza di linguaggio non si sarebbe sviluppata alcuna conoscenza scientifica, né alcuna riflessione filosofica. Infatti, come è stato detto, il linguaggio della scienza non è la matematica (che è uno strumento scientifico formidabile) ma il linguaggio naturale⁷⁴.

Senza linguaggio non è possibile sviluppare alcuna impresa scientifica, né alcuna significativa riflessione filosofica. Quindi, il fondamento di ogni conoscenza è rappresentato prima di tutto dal linguaggio. Lo studio e la riflessione sulle possibilità e sui limiti del linguaggio è senz'altro più fondamentale di quello delle particelle elementari⁷⁵. Allo stesso tempo deve essere puntualizzato che senza

⁷³ Blumenberg 1981; Taylor e Dewsbury 2018; Reynolds 2022.

⁷⁴ Smolin 2013, p. 253.

⁷⁵ Cassirer 1923; 1944; Langer 1942; Fabbro 2024; Hoffmann 2012, p. 223.

esseri umani non è possibile mettere in scena alcuna comunicazione verbale; poiché soltanto gli esseri umani sono in grado di generare ed evocare negli altri esseri umani delle immagini mentali simili a quelle presenti nella loro mente. Dunque per parlare, per conoscere e per riflettere in maniera filosofica è necessaria la presenza di una mente capace di generare prodotti immaginativi e che sia interessata a condividerli. Sembra che almeno per ora soltanto gli esseri umani dispongano di una simile mente⁷⁶.

Il sistema mentale presente negli esseri umani rientra nella categoria più generale dei processi mentali presenti in numerose specie di animali (mammiferi, rettili, anfibi, pesci, insetti, molluschi). La presenza di una psiche (con certe caratteristiche) è dunque un vincolo fondamentale per riuscire a sviluppare un linguaggio. Tuttavia la psiche è un insieme di processi mentali di natura rappresentativa, relazionale, affettiva e cognitiva che richiede la presenza di un sistema nervoso complesso; il sistema neurobiologico a sua volta richiede la presenza di un organismo multicellulare nel quale si sia differenziato il tessuto nervoso⁷⁷. I livelli menzionati: il linguaggio, la

⁷⁶ Tomasello 2014.

⁷⁷ Fabbro 2021b; 2024.

psiche, il sistema nervoso, il livello cellulare, hanno a che vedere con alcune caratteristiche tipiche di tutti i processi viventi, ossia la complessità, la costruzione di strutture ordinate, l'autopoiesi, la memorizzazione e lo scambio di "informazioni".

Tutti questi livelli (cellule, tessuto nervoso, processi psichici), che possiamo immaginare come incapsulati all'interno del linguaggio, rappresentano dei vincoli (necessità) – che devono essere necessariamente presenti – affinché possa svilupparsi la scienza e la riflessione filosofica. Queste due imprese conoscitive oltre a fornire delle possibilità presentano dei limiti. Uno di questi limiti è costituito dal fatto che l'impresa scientifica – come pure la riflessione filosofica – è il frutto di una costruzione umana, una costruzione che è influenzata dallo sviluppo storico e sociale come pure da una vasta serie di vincoli biologici (collegati all'evoluzione del sistema nervoso, della psiche e in particolare all'autocoscienza). Ciò significa che altre forme di vita intelligente possono aver sviluppato una scienza e una filosofia completamente diverse. Tuttavia, poiché la scienza è necessariamente collegata alla dimensione sperimentale, la diversità non dovrebbe significare una completa arbitrarietà.



10. CONCLUSIONI

Le ricerche teorico-pratiche sviluppate nella prima metà del Novecento volte a realizzare sistemi automatici di contraerea (Norbert Wiener) e a migliorare l'efficienza dei sistemi di comunicazione (Ralph Hartley e Claude Shannon) hanno posto la ricerca scientifica di fronte al concetto di "informazione". Un'entità che, secondo Wiener, non appartiene al mondo della materia e dell'energia, sebbene abbia necessità di un supporto materiale per manifestarsi. Lo sviluppo dei calcolatori digitali (Alan Turing e John von Neumann), dotati di componenti fisiche (*hardware*) e di programmi (*software*), e la messa a punto di sistemi informatici capaci di apprendimento automatico (reti neurali, *machine learning*) ha permesso di sviluppare dei sistemi di intelligenza artificiale generativi, in grado di programmare, elaborare testi, tradurre, eseguire compiti di riconoscimento visivo, eccetera.

Molte persone sono diventate consapevoli di essere di fronte a un cambiamento

epocale. In questa trasformazione l'informazione gioca un ruolo centrale. Non si tratta soltanto di un cambiamento tecnologico, che riguarda soprattutto il rapporto tra gli esseri umani e le macchine, ma anche di un cambiamento di natura culturale, economica, militare, politica e filosofica. Lo sviluppo di sistemi artificiali in grado di elaborare testi, di tradurre documenti, sta influenzando in maniera massiva lo studio, l'insegnamento e l'editoria. Si prevede che i sistemi di intelligenza artificiale saranno in grado di sostituire – almeno parzialmente – l'attività umana (ad esempio si ritiene che l'intelligenza artificiale sarà in grado di leggere e interpretare lastre radiologiche meglio degli esseri umani).

Anche il mondo militare è stato influenzato dalla rivoluzione digitale. Sono aumentate le prove di forza e l'aggressività tra nazioni, stati e blocchi in contrapposizione. Una buona parte dell'attività bellica viene svolta con sistemi tecnologici avanzati (sistemi di spionaggio e controspionaggio elettronici, droni, eccetera). Le tecniche di propaganda militare e politica sono diventate sempre più martellanti e sofisticate. Le informazioni presentate assumono sempre di più la struttura dicotomica delle correnti religiose gnostiche: da una parte le "forze del bene", cui è

Conclusioni

dato continuamente spazio e dall'altra parte le "forze del male", i cui spazi di intervento sono completamente negati.

La rivoluzione generata dall'informazione (digitale) non poteva non avere un importante effetto anche sulla riflessione filosofica. Un esempio di tale trasformazione è la nascita presso l'Università di Udine del corso di laurea in Filosofia e trasformazione digitale, il cui coordinatore, Luca Taddio, ha gentilmente scritto la prefazione di questo saggio. La riflessione a 360° sul concetto di informazione ha permesso di riprendere in considerazione il ruolo che questa entità gioca al di fuori del dominio tecnologico, ossia nell'ambito più generale della biologia.

Ripensare in maniera filosofica il concetto di "informazione" ci porta a compiere un ribaltamento dell'usuale modo di pensare. Cioè l'informazione è prima di tutto un'entità centrale in ambito biologico, non può esistere alcun organismo vivente senza informazione. Non credo sia dovuto al caso il fatto che la scoperta della struttura e delle funzioni del DNA sia avvenuta nei primi anni Cinquanta subito dopo la pubblicazione delle ricerche effettuate da Wiener e Shannon.

La scoperta della struttura del DNA da parte di Watson e Crick ha mostrato

che il “segreto della vita” è collegato al concetto di “informazione”. Il magazzino delle informazioni per costruire un organismo vivente è costituito dall’ordine della sequenza delle quattro lettere del DNA. Inoltre, esiste un “codice genetico” (simile al “codice Morse”) costituito da un “piccolo dizionario che indica come si passa dal linguaggio di quattro lettere degli acidi nucleici al linguaggio di venti lettere delle proteine”¹.

Successivamente diversi biologi (Jaques Monod e François Jacob), neuroscienziati (John Z. Young, Chris Frith, Thomas Metzinger) e psicologi (Howard Gardner, Richard Gregory, Gregory Bateson) si resero conto che l’“informazione” giocava un ruolo centrale non soltanto a livello cellulare (DNA e regolazione del metabolismo), ma anche livello degli organi e degli apparati, in particolare svolgeva un ruolo centrale nel funzionamento del sistema nervoso². Infine, ci si è resi conto che il prodotto emergente dell’attività del sistema nervoso, la “psiche”, non possiede una natura fisica ma informazionale, e questa natura si esprime in manie-

¹ Crick 1988, p. 120.

² Monod 1970; Jacob 1981; Young 1987; Frith 2007; Metzinger 2009; Gardner 1985; Gregory 1981; Bateson 1972.

Conclusioni

ra piena – non solo nelle diverse funzioni cognitive (attività sensoriale, motoria, memoria, regolazione affettiva) – ma soprattutto nel “linguaggio”.

Lo sviluppo dei sistemi di controaerea automatici e dei modelli matematici della comunicazione ha permesso di identificare un’entità nuova: l’informazione, che in realtà è l’elemento costitutivo della vita. Un’entità che si ritiene sia comparsa per la prima volta sulla Terra più di quattro miliardi di anni fa quando si sono sviluppati i primi organismi viventi dotati di DNA e/o RNA. Per tutte queste ragioni credo che la riflessione filosofica sul concetto di informazione non può prescindere dall’ambito genetico, cellulare, neurobiologico, psicologico e linguistico.

10.1 Una logica simbolica e combinatoria

Un aspetto centrale della riflessione filosofica sull’informazione biologica riguarda la sua dimensione simbolica. Un “segno” si riferisce a “qualcosa che sta per qualcos’altro”. I “simboli” sono segni particolari nei quali il rapporto tra il “qualcosa” e il “qualcos’altro” è completamente arbitrario. Le parole sono dei simboli dato che non c’è nulla che leghi la parola “dog” al concetto di

“canis lupus familiaris”. Alla stessa stregua non c'è nulla che legghi le tre lettere del DNA “ACU” all'aminoacido “treonina”. Questi rapporti dipendono da un contesto storico il più delle volte casuale.

L'informazione biologica è legata all'ordine che la sequenza delle lettere (nucleotidi e lettere dell'alfabeto) assume. Combinando un numero finito di lettere (quattro lettere negli acidi nucleici del DNA, ventuno lettere nell'alfabeto italiano; due simboli 0 e 1 per il codice binario) è possibile rappresentare tutte le informazioni presenti negli organismi viventi, tutte le opere della letteratura italiana³; e per quanto riguarda il codice binario tutto quello che è capace di fare l'intelligenza artificiale e più in generale il mondo informatico.

L'informazione pur essendo legata a un supporto materiale è indipendente da qualsiasi tipo di supporto. Ad esempio, una poesia può essere espressa verbalmente (suoni), o da un sintetizzatore vocale (telefonino), oppure può essere trascritta in una sequenza di lettere dell'alfabeto. Alla stessa stregua l'informazione contenuta nel DNA di un organismo vivente può essere trascritta

³ Blumenberg 1981, cap. 22.

Conclusioni

nell'ordine della sequenza dei nucleoidi su carta o su di un altro supporto.

L'organizzazione della vita nei suoi vari livelli (genetico, cellulare, neurobiologico, psichico e linguistico) assomiglia in maniera notevole ai giochi delle carte (briscola, tre-sette, scala quaranta, poker) inventati dagli esseri umani. Il numero delle carte è limitato (come sono limitati i nucleotidi, gli aminoacidi, le funzioni neuronali, i fonemi), mentre ogni partita è diversa da tutte le altre. A livello metaforico è possibile considerare le diverse carte come i supporti, mentre le partite rappresentano in maniera più significativa il livello delle informazioni. L'idea che i differenti livelli biologici abbiano a che fare con la dimensione del gioco è stata sostenuta da François Jacob in uno dei suoi ultimi libri: *Il gioco dei possibili* (1981).

10.2 *Saper fare senza capire*

In questo saggio ho cercato di argomentare intorno al ruolo centrale che le informazioni giocano nelle diverse discipline biologiche. Eppure tale ruolo è stato chiarito soltanto dopo che alcuni matematici, fisici e ingegneri (Wiener, Shannon, Turing e von Neumann), per motivi di natura tecnica e mili-

tare (linee telefoniche, sistemi automatici di tiro, sviluppo di calcolatori per decodificare codici militari), hanno sviluppato alcune teorie matematiche relative alla predizione e alla comunicazione, individuando una nuova ed enigmatica entità – collegata con il concetto fisico di entropia – chiamata “informazione”.

Che la vita e la biologia avessero a che fare con il concetto di entropia (e quindi di informazione) era stato precedentemente avanzato a livello di ipotesi già nel 1944 da Erwin Schrödinger, ma confermato in via definitiva soltanto qualche decina di anni dopo da Crick, Watson, Monod, Jakob e altri. Non è la prima volta che gli esseri umani prima costruiscono dei dispositivi tecnologici e quindi per renderli più efficienti elaborano delle teorie che permettono loro di comprendere aspetti del mondo molto più generali dei dispositivi tecnologici da cui sono partiti. Qualcosa del genere è accaduto con l'invenzione delle macchine a vapore che hanno permesso di elaborare sia il concetto di entropia sia il secondo principio della termodinamica (probabilmente la “legge” più importante di tutta la fisica)⁴.

⁴ Sen 2020.

Conclusioni

Questa modalità di procedere, “prima fare e poi capire”, mi sembra sia arrivata al capolinea. In almeno due settori di punta – quello delle neuroscienze e quello dell’intelligenza artificiale generativa – si riescono a fare cose particolarmente significative senza capire, e senza nemmeno poter avere alcuna speranza di capire nemmeno in futuro. In ambito neuroscientifico è stato possibile estrarre segnali elettrici da diverse strutture del cervello (umano ed animale), elaborare questi segnali in maniera complessa al fine di guidare degli attuatori meccanici. In questa maniera si intravede la possibilità pratica di guidare mentalmente delle macchine. Tuttavia, nonostante sia possibile realizzare dispositivi di questo genere (e in un prossimo futuro migliorarli e miniaturizzarli), la nostra comprensione sul funzionamento del sistema nervoso è rimasta tale e quale (ossia estremamente limitata)⁵.

Nell’ambito dell’intelligenza artificiale le complesse architetture di *machine learning* (basate sulle reti neurali) risolvono problemi estremamente complessi, come la scrittura di programmi software, l’elaborazione di testi, la traduzione, la simulazione della struttura terziaria delle proteine, eccetera,

⁵ Fabbro 2016; 2021a.



senza che si abbia la più pallida idea di come questi sistemi riescano a ottenere questi risultati. In diversi centri si cerca di elaborare dei modelli semplificati di quanto accade nei sistemi dell'intelligenza artificiale, ma questi modelli – elaborati da ricercatori umani – riescono a descrivere soltanto una frazione infinitesima di quanto realmente accade dentro queste macchine. L'idea è che non capiamo e non riusciremo mai a capire (in maniera dettagliata) quello che accade all'interno dei sistemi di intelligenza artificiale (generativa)⁶.



10.3 L'informazione e la questione della tecnica



L'insieme delle tecnologie sviluppate dagli esseri umani ha determinato una modificazione drammatica del loro modo di vivere. Ricordo la mia infanzia, sono cresciuto in un piccolo centro abitato ad alcuni chilometri da Udine, nella nostra casa era presente l'acqua corrente, l'energia elettrica e la radio. Gli unici prodotti alimentari che venivano acquistati dalla mia famiglia erano il sale e il caffè, il resto veniva prodotto in maniera autonoma (orto, animali da cortile, alberi da frutta, viti).

⁶ Tegmark 2017; Cristianini 2023; 2024.



Conclusioni

La mia famiglia di allora dipendeva in maniera molto limitata dagli altri. Dagli anni Sessanta fino a ora ho potuto assistere a un cambiamento dello stile di vita senza precedenti. Ho assistito all'acquisizione degli elettrodomestici (lavatrice, frigorifero, cucina economica, asciugatrice), della automobile, del telefono fisso, della televisione, dei computer, stampanti, fax, di Internet, e infine del telefonino.

Sono cambiate anche le abitazioni. Sono nato in una casa costruita negli anni Venti del Novecento da mio nonno paterno (senza servizi igienici in casa e senza riscaldamento). Negli anni Settanta mi sono trasferito a Udine in un appartamento dotato di servizi igienici e di riscaldamento. Ora le nuove abitazioni, "autonome" dal punto di vista energetico, altamente informatizzate, prevedono un'obsolescenza programmata, con una durata di circa trent'anni, dopodiché debbono essere completamente ripristinate.

Le nuove abitazioni, le nuove macchine elettriche sono apparentemente dotate di autonomia energetica, ma l'energia ottenuta dai pannelli solari (disposti sui tetti delle nostre case) è controllata da sistemi centralizzati, per non parlare dei sistemi che im-



magazzino l'energia (le batterie) che devono essere periodicamente rinnovati. Man mano che la tecnologia avanza l'autonomia dell'individuo diminuisce. Le innovazioni tecnologiche realizzate negli ultimi sessant'anni hanno reso la vita indubbiamente più facile, tuttavia è notevolmente diminuita l'indipendenza. La vita si è accelerata, il tempo è sempre di più scandito dall'esterno. Inoltre, le menti più predisposte sono diventate dipendenti da alcuni dispositivi tecnologici (TV, telefonini, social media) in maniera "quasi" patologica.

Secondo alcuni filosofi, tra cui Martin Heidegger ed Emanuele Severino, la tecnologia non è qualcosa che si pone semplicemente al servizio degli esseri umani⁷. Essa – per ora a un livello inconsapevole – ha iniziato a manifestare in maniera sempre più evidente delle finalità proprie. La tecnologia tende a perpetuarsi, a incrementare sé stessa e ad auto-organizzarsi, indipendentemente dai problemi che sta creando agli esseri umani (dipendenza, apatia, senso di impotenza, possibilità di un olocausto nucleare) e alla natura (riscaldamento globale, distruzione di diversità biologica).

⁷ Heidegger 1954; Severino 2002; 2019.



Conclusioni

L'ambito informatico-militare è quello che secondo Severino esprime meglio l'essenza della tecnica. Siccome le società umane hanno basato la risoluzione dei conflitti prevalentemente sulla forza⁸, il ricorso alla tecnica è diventato prioritario. Anche gli Stati, le ideologie e le religioni più conservatrici per vincere, per riuscire a imporsi sugli altri devono fare ricorso alle tecniche militari più moderne. Non è possibile vincere ed esercitare la forza senza la tecnologia.

Diversi autori si chiedono come andrà a finire. Le macchine, l'intelligenza artificiale prenderanno il sopravvento sugli esseri umani? Ci permetteranno di sopravvivere? Ci lasceranno un margine di libertà? Non è facile rispondere a queste domande. Ciò che sembra accertato è che “la tecnologia sta acquistando una propria autonomia e sempre di più imporrà la propria agenda”⁹. Per quanto riguarda il margine di libertà che probabilmente ci verrà concesso (dalla tecnica) non dobbiamo dimenticare che già il linguaggio è uno strumento tecnologico, uno strumento che ci ha offerto molte possibilità ma anche significativi limiti. Tra le altre cose

⁸ Weil 1941.

⁹ Kelly 2010, p. 362.

ci ha impedito di rimanere una specie che viveva in una dimensione prevalentemente naturale, come gli scimpanzé, gli oranghi e i gorilla. Una dimensione vicina alle origini preverbalì che alcuni gruppi di anarchici anti-civilizzazione auspicano, attraverso il collasso della nostra società¹⁰.

¹⁰ Ivi, cap. 10.

POSTFAZIONE

Il libro di Franco Fabbro affronta un problema importante dal punto di vista filosofico: la rappresentazione della realtà o meglio di una porzione della realtà (gli organismi viventi, gli umani, in particolare) attraverso l'uso di diversi livelli di astrazione: livello genetico, livello del sistema nervoso, livello della mente, livello linguistico. Ogni livello è descritto attraverso l'uso di un insieme di concetti specifici di quel livello e permette di risolvere problemi o, più in generale, rispondere a domande pertinenti al livello considerato, ossia appropriate rispetto alla concettualizzazione usata.

L'idea di rappresentare la realtà mediante livelli d'astrazione è spesso utilizzata per descrivere-modellare sistemi complessi. Ogni livello descrive una prospettiva particolare e, come tale, è inerentemente parziale. L'intero sistema può essere compreso utilizzando la molteplicità delle descrizioni proposte.

Nelle scienze informatiche, per esempio, si usa un approccio simile per descrivere i sistemi di calcolo, i sistemi operativi, le reti.

Un sistema di calcolo (un computer) per esempio, può essere descritto a livello di circuiti elettronici (transistor, diodi, resistori, collegamenti elettrici, eccetera), a livello di porte logiche e sistemi di porte logiche (porte AND, OR, NOT, circuiti combinatori e sequenziali) a livello di architettura funzionale (secondo il modello di von Neumann: memoria centrale, unità aritmetica e logica, unità centrale di elaborazione, registri, eccetera) oppure a livello ancora più astratto come un agente in grado di risolvere problemi e interagire con l'ambiente. Ogni livello di descrizione tratta un particolare tipo di "medium": segnali elettrici, singoli bit o stringhe di bit, dati e istruzioni, informazioni e conoscenze (si pensi ad esempio ai sistemi esperti della IA simbolica degli anni Novanta).

La rappresentazione mediante livelli di astrazione è utile ed efficace (nonostante la realtà non sia probabilmente segmentata in questo modo o forse non lo è in alcun modo), ma pone una serie di problemi complessi. Il primo problema riguarda il numero di livelli. Quanti livelli sono necessari o appropriati per gli scopi dell'analisi? Il secondo problema riguarda la relazione tra livelli: esiste una qualche relazione gerarchica tra i livelli? C'è bisogno di un livello fonamen-

tale? Che tipo di relazione si può stabilire tra le entità (es. le concettualizzazioni) di ciascun livello?

Franco Fabbro propone di usare “l’informazione” come concetto unificante dei livelli d’astrazione proposti. Ogni livello è caratterizzato da un certo tipo di informazione: informazione genetica (DNA: nucleotidi e loro combinazioni), informazione neuronale (diffusione di neurotrasmettitori nel connettoma, differenze tra stati di attivazione neuronale); informazione mentale (processi di simbolizzazione); informazione linguistica (segni linguistici).

Il concetto di informazione è complesso e tuttora poco chiaro. Nel libro sono proposte diverse concettualizzazioni. Si parla di informazione come differenza, entropia, riduzione dello stato di incertezza o del livello di sorpresa di un individuo dato il suo stato informativo, ma anche di informazione come segno/simbolo.

Un aspetto importante riguarda la relazione tra informazione sintattica e informazione semantica. *La teoria matematica delle comunicazioni* di Shannon e Weaver tratta l’informazione sintattica e i processi di codifica e decodifica. La semiotica e l’ermeneutica si occupano di segni, significato e di interpretazione di segni. Il punto critico

è capire dove e come avviene il passaggio tra informazione sintattica e semantica. In quale livello o tra quali livelli descritti da Franco Fabbro avviene tale passaggio?

Sembrerebbe plausibile pensare che il passaggio avvenga tra il livello neurale (cervello) e quello psichico (mente) nel momento in cui emerge una qualche distinzione tra soggetto e oggetto. Se fosse così: qual è il ruolo dell'emergenza (ontologica, inferenziale o concettuale) nello spiegare questo fenomeno? Oppure si può ipotizzare che tale passaggio avvenga in ciascun livello ogni volta che determinate configurazioni di differenze (informazioni sintattiche) generano un valore (e quindi un senso) per l'individuo. Mi sembra di capire che l'autore sostenga entrambe le ipotesi. Il problema rimane comunque aperto.

Prof. Elio Toppino
Docente di Progettazione
di sistemi multimodali
presso l'Università degli Studi di Udine

RINGRAZIAMENTI

Desidero ringraziare Luciano Massi, Elio Toppano, Lorenzo Sucameli, Luca Taddio e Francesco Tommasi per aver letto il manoscritto e aver proposto importanti commenti, suggerimenti e critiche. Le idee espresse e l'eventuale presenza di imprecisioni o errori è, invece, responsabilità esclusivamente mia. Sono grato a Luca Taddio e Elio Toppano per aver scritto rispettivamente la prefazione e la postfazione di questo saggio. Desidero ringraziare anche mia moglie Federica per le numerose discussioni filosofiche e per il suo costante sostegno. La scrittura di questo libro è frutto soltanto dall'ingegno umano. Nessuna frase o parte di questo saggio sono state generate mediante sistemi di intelligenza artificiale.



BIBLIOGRAFIA

Adriaans P., van Benthem J.

2008 *Introduction: Information is what Information does*, in P. Adriaans, J. van Benthem (a cura di), *Handbook of the Philosophy of Science*, vol. 8: *Philosophy of Information*, Elsevier, Amsterdam, pp. 7-31.

Agamben G.

2008 *Il linguaggio e la morte*, Einaudi, Torino.

Alberts B., Bray D., Hopkin K., Johnson A., Lewis J., Raff M., Roberts K., Walter P.

2014 *L'essenziale di biologia molecolare della cellula*, a cura di Aldo Pagano, Zanichelli, Bologna, 2016.

Aleksander I.

2000 *Come si costruisce una mente*, tr. it. di S. Frediani, Einaudi, Torino 2001.

Andersen R.A., Aflalo T., Bashford L., Bjänes D., Kellis S.

2022 *Exploring Cognition with Brain-Machine Interfaces*, in "Annual Review of Psychology", vol. 73, pp. 131-158.

Andorno C.

2005 *Che cos'è la pragmatica linguistica*, Carocci, Roma.

Aristotele

1999 *Etica Nicomachea*, tr. it. di C. Natali, Laterza, Roma-Bari.

2007a *Dell'anima*, tr. it. di A. Russo e L. Laurenti, Laterza, Roma-Bari.

2007b *Della interpretazione*, a cura di M. Zanatta, Rizzoli, Milano.

Filosofia dell'informazione biologica

- 2016 *Politica*, a cura di F. Ferri, Bompiani, Milano.
Atkinson Q. A.
2011 *Phonemic diversity supports a serial founder effect model of language expansion from Africa*, in "Science", 332, pp. 346-349.
- Atlan H.
2007 *L'organisation biologique et la théorie de l'information*, Seuil, Paris.
- Baddeley A., Eysenck M.W., Anderson M.C.
2011 *La memoria*, il Mulino, Bologna.
- Ball P.
2025 *La chiave della vita è l'RNA, non il DNA*, in "Le Scienze", n. 686, pp. 62-63.
- Barbieri M.
2002 *The Organic Codes: The Birth of Semantic Biology*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Barrow J.
1988 *Il mondo dentro il mondo*, tr. it. di F. di Liberto e S. Chiarini, Adelphi, Milano 1991.
- Bartol T.M., Bromer C., Kinney J., Chirillo M.A., Bourne J.N., Harris K.M., Sejnowski T.J.
2015 *Nanoconnectomic Upper Bound on the Variability of Synaptic Plasticity*, in "eLife", 4: e10778.
- Bateson G.
1972 *Verso un'ecologia della mente*, tr. it. di G. Longo, Adelphi, Milano.
- Bausani A.
1974 *Le lingue inventate. Linguaggi artificiali, linguaggi segreti, linguaggi universali*, Astrolabio, Roma.
- Bensmaia S.J., Hollins M.
2005 *Pacinian Representations of Fine Surface Texture*, in "Perception & Psychophysics", vol. 67, n. 5, pp. 842-854.



Bibliografia

- Bettini G.
1963 *Il segno. Dalla magia fino al cinema*, Edizioni i 7, Milano.
- Biro J.C.
2011 *Biological Information – Definitions from a Biological Perspective*, in “Information”, vol. 2, pp. 117-139.
- Blumenberg H.
1981 *La leggibilità del mondo. Il libro come metafora della natura*, tr. it. di B. Argenton, il Mulino, Bologna 1984.
- Borden G.J., Harris K.S.
1984 *Speech Science Primer*, Lippincott Williams & Wilkins, Baltimore.
- Bouton C., Shaikhouni A., Annetta N., Bockbrader M., Friedenberg D., Nielson D., Sharma G., Sederberg P., Glenn B., Mysiw W.J., Morgan A., Deogaonkar M., Rezai A.
2016 *Restoring Cortical Control of Functional Movement in a Human with Quadriplegia*, in “Nature”, vol. 533, n. 7602, pp. 247-250.
- Braitenberg V., Schüz A.
1998 *Cortex: Statistics and Geometry of Neuronal Connectivity*, Springer, Berlin.
- Bratman S.
2021 *Spontaneous Order and the Origin of Life*, Spontaneous Order Publications, Albany.
- Bucci E.
2024 *Geni, memi e bit. Evoluzione biologica, termodinamica e teoria dell'informazione*, Mondadori Università, Milano.
- Bushdid C., Magnasco M.O., Vosshall L.B., Keller A.
2014 *Humans Can Discriminate More than 1 Trillion Olfactory Stimuli*, in “Science”, vol. 343, n. 6177, pp. 1370-1372.



Filosofia dell'informazione biologica

Bynum T.W.

2016 *Informational Methaphysics. The Informational Nature of Reality*, in L. Floridi (a cura di), *The Routledge Handbook of Philosophy of Information*, Routledge, London, pp. 203-218.

Callaghan W.

1978 *Introduzione a Charles S. Peirce*, in C.S. Peirce, *Scritti di filosofia*, tr. it. di L. Leone, Fabbri, Milano 2004, p. 29.

Cannon W.B.

1932 *La saggezza del corpo*, Bompiani, Milano 1956.

Cantone D., Fabbro F.

2025 *Umani, animali e macchine. Filosofia e neuroscienze del linguaggio*, Bollati Boringhieri, Torino.

Capra F., Luisi P.L.

2014 *Vita e natura. Una visione sistemica*, tr. it. di G. Frezza, Aboca, Sansepolcro.

Carrillo-Reid L., Larriva-Sahd J.

2020 *Contributions of Lorente de Nó to the Nonlinear Circuitry of the Brain*, in "Anatomical Record" (Hoboken), vol. 303, n. 5, pp. 1215-1220.

Cassirer E.

1923 *Filosofia delle forme simboliche. Il linguaggio*, tr. it. di E. Arnaud, La Nuova Italia, Firenze 1974.

1944 *Saggio sull'uomo*, tr. it. di C. d'Altavilla, Armando, Roma 1982.

Chalmers D.

1996 *La mente cosciente*, tr. it. di A. Paternoster e C. Meini, McGraw-Hill, Milano 2003.

Chomsky N.

1975 *Riflessioni sul linguaggio. Grammatica e filosofia*, tr. it. di S. Scalise, Einaudi, Torino 1981.

1981 *Regole e rappresentazioni. Sei lezioni sul linguaggio*, tr. it. di G. Gallo, Dalai, Milano 2008.

Bibliografia

2016 *Il mistero del linguaggio. Nuove prospettive*, tr. it. di M. Greco, Feltrinelli, Milano 2018.

Christian B.

2011 *Esseri umani. Che cosa dice di noi il test di Turing*, tr. it. di M. Capocci, Biblioteca delle Scienze, Roma 2012.

Clark A.

2024 *The Experience Machine. How Our Minds Predict and Shape Reality*, Penguin, London.

Collier J.

2008 *Information in Biological Systems*, in P. Adriaans, J. van Benthem (a cura di), *Handbook of the Philosophy of Science*, vol. 8: *Philosophy of Information*, Elsevier, Amsterdam, pp. 771-796.

Cook R.G., Smith J.D.

2006 *Stages of Abstraction and Exemplar Memorization in Pigeon Category Learning*, in "Psychological Science", vol. 17, pp. 1069-1066.

Corballis M.

2002 *Dalla mano alla bocca. Le origini del linguaggio*, tr. it. di S. Romano, Raffaello Cortina, Milano 2008.

2015 *La mente che vaga. Cosa fa il cervello quando siamo distratti*, tr. it. di S. Parmigiani, Raffaello Cortina, Milano 2016.

2017 *La verità sul linguaggio (per quel che ne so)*, tr. it. di I. Adornetti, Carocci, Roma 2020.

Craik K.

1943 *Ipotesi sulla natura del pensiero*, tr. it. di G. Gabella, in V. Somenzi (a cura di), *La fisica della mente*, Boringhieri, Torino 1969, pp. 32-79.

Cramer F.

1988 *Caos e ordine. La complessa struttura del vivente*, tr. it. di P. Budinich, Bollati Boringhieri, Torino 1994.

Filosofia dell'informazione biologica

Crick F.H.

1981 *L'origine della vita*, tr. it. di B. Vitale, Garzanti, Milano 1983.

1988 *La folle caccia. La vera storia della scoperta del codice genetico*, tr. it. di L. Sosio, Rizzoli, Milano 1990.

Cristianini N.

2023 *La scorciatoia. Come le macchine sono diventate intelligenti senza pensare in modo umano*, il Mulino, Bologna.

2024 *Macchina sapiens. L'algoritmo che ha rubato il segreto della conoscenza*, il Mulino, Bologna.

Davies P.

2000 *Da dove viene la vita. Il mistero dell'origine sulla Terra e in altri mondi*, tr. it. di G. Sabato, Mondadori, Milano 2000.

Davis M.

2000 *Il calcolatore universale. Da Leibniz a Turing*, tr. it. di G. Rigamonti, Adelphi, Milano 2012.

de Dube C.

2002 *Come evolve la vita. Dalle molecole alla mente simbolica*, tr. it. di C. Serra, Raffaello Cortina, Milano 2003.

2005 *Alle origini della vita*, tr. it. di L. Sosio, Bollati Boringhieri, Torino 2008.

de Saussure F.

1922 *Corso di linguistica generale*, tr. it. di T. de Mauro, Laterza, Roma-Bari 1979.

Deacon T.

2012 *The symbol concept*, in K. Gibson, M. Tellerman (Eds), *The Oxford Handbook of Language Evolution*, Oxford University Press, Oxford, pp. 393-406.

DeFelipe J.

2011 *The Evolution of the Brain, the Human Nature of Cortical Circuits, and Intellectual Creativity*, in "Frontiers in Neuroanatomy", vol. 5: 29.

Bibliografia

Dehaene S.

2009 *I neuroni della lettura*, tr. it. di C. Sinigaglia, Raffaello Cortina, Milano 2009.

Dehaene S., Cohen L.

2007 *Cultural Recycling of Cortical Maps*, in "Neuron", vol. 56, n. 2, pp. 384-398.

Demozzi S.

2012 *Forma, sostanze, differenza. Brevi cenni di "epistemologia batesoniana"*, in "Ricerche di Pedagogia e Didattica", 7, pp. 1-11.

Descartes R. (Cartesio)

1636 *Discorso sul metodo*, tr. it. di A. Carlini, Laterza, Roma-Bari 1975.

Detienne M.

1969 *I maestri di verità nella Grecia arcaica*, tr. it di A. Fraschetti, Laterza, Roma-Bari 1983.

Deutscher G.

2010 *La lingua colora il mondo*, tr. it. di E. Griseri, Bollati Boringhieri, Torino 2013.

Dewey J.

1910 *Come pensiamo*, tr. it. di C. Bove, Raffaello Cortina, Milano 2019.

Dor D.

2015 *The Instruction of Imagination: Language as a Social Communication Technology*, Oxford University Press, Oxford.

Dretske F.

1981 *Knowledge and the Flow of Information*, MIT Press, Cambridge.

Duff M.C., Covington N.V., Hilverman C., Cohen N.J.

2020 *Semantic Memory and the Hippocampus: Revisiting, Reaffirming, and Extending the Reach of Their Critical Relationship*, in "Frontiers of Human Neuroscience", vol. 13, n. 471, pp. 1-17.

Filosofia dell'informazione biologica

Dunbar R.I.

2014 *Human Evolution*, Pelican Books, London.

Eddington A.

1928 *La natura del mondo fisico*, tr. it. di C. Cortese
De Bosis e L. Gialane, Laterza, Roma-Bari 1987.

Edelman G.

1987 *Darwinismo neurale. La teoria della selezione
dei gruppi neuronali*, tr. it. di S. Ferraresi, Einaudi,
Torino 1995.

1990 *Il presente ricordato*, tr. it. di L. Sosio, Rizzoli,
Milano 1991.

1992 *Sulla materia della mente*, tr. it. di S. Frediani,
Adelphi, Milano 1993.

2004 *Più grande del cielo*, tr. it. di S. Frediani, Einau-
di, Torino 2004.

Edelman G., Tononi G.

2000 *Un universo di coscienza. Come la materia di-
venta immaginazione*, tr. it. di S. Ferraresi, Einaudi,
Torino 2000.

Escarpit R.

1976 *Teoria dell'informazione e della comunicazione*,
tr. it. di M.G. Rombi, Editori Riuniti, Roma 1979.

Evans J.

2017 *Pensiero e ragionamento*, tr. it. di R. de Biasi,
Le Scienze, Roma 2019.

Fabbro F.

1996 *Il cervello bilingue. Neurolinguistica e poliglos-
sia*, Astrolabio, Roma.

1999 *The Neurolinguistics of Bilingualism*, Psycho-
logy Press, London.

2016 *Le neuroscienze: dalla fisiologia alla clinica*, Ca-
rocci, Roma.

2018 *Identità culturale e violenza. Neuropsicologia
delle lingue e delle religioni*, Bollati Boringhieri,
Torino.

Bibliografia

- 2021a *Che cos'è la psiche. Filosofia e neuroscienze*, Astrolabio, Roma.
- 2021b *I fondamenti biologici della filosofia*, Mimesis, Milano-Udine.
- 2023 *Biological and Neuroscientific Foundations of Philosophy*, Routledge, London.
- 2024 *La svolta biopsichica. Quarantotto brevi meditazioni filosofiche controcorrente*, Astrolabio, Roma.
- Fernyhough C.
2016 *Le voci dentro. Storia e scienza del dialogo interiore*, tr. it. di T. Boldrini, Raffaello Cortina, Milano 2018.
- Foucault M.
1983 *Discorso e verità nella Grecia antica*, a cura di A. Galeotti, Donzelli, Roma 2005.
- Freud S.
1895 *Progetto di una psicologia*, a cura di E. Sagittario, Boringhieri, Torino 1977.
- Friston K.
2010 *The Free-Energy Principle: a Unified Brain Theory?*, in "Nature Reviews Neuroscience", vol. 11, pp. 127-138.
- Frith C.
2007 *Inventare la mente. Come il cervello crea la nostra vita mentale*, tr. it. di M. Berlingeri e L. Guzzardi, Raffaello Cortina, Milano 2008.
- Fromkin V., Rodman R., Hyams N.
2013 *Introduction to Language*, Cengage Learning, New York.
- Garbini G.
2001 *Storia e ideologia nell'Israele antico*, Paideia, Brescia.
- Gardner E., Johnson K.
2013 *La codificazione sensoriale*, in E. Kandel, J.



Filosofia dell'informazione biologica

- Schwartz, T. Jessel, S. Siegelbaum, A.J. Hudspeth (a cura di), *Principi di neuroscienze*, tr. it. di V. Perri, G. Spidalieri, Ambrosiana, Milano, 2015, pp. 449-474.
- Gardner H.
1985 *La nuova scienza della mente. Storia della rivoluzione cognitiva*, tr. it. di L. Sosio, Feltrinelli, Milano 1988.
- Gervasoni D., Lin S.C., Ribeiro S., Soares E., Pantoja J., Nicoletis M.
2004 *Global Forebrain Dynamics Predict Rat Behavioral States and Their Transitions*, in "Journal of Neuroscience", vol. 24, n. 49, pp. 11137-11147.
- Gibbs J.W.
1902 *Elementary Principles in Statistical Mechanics*, Charles Scribner's Sons, New York.
- Ginsburg S., Jablonka E.
2014 *Memory, Imagination, and the Evolution of Modern Language*, in D. Dor, C. Knight, J. Lewis (a cura di), *The Social Origins of Language*, Oxford University Press, Oxford, pp. 317-324.
- Gitt W., Compton R., Fernandez J.
2014 *Biological Information. What is It?*, in R.J. Marks II et al. (a cura di), *Biological Information. New perspectives. Proceedings of a Symposium Held May 31 through June 3, 2011 at Cornell University*, World Scientific, Singapore 2014, pp. 11-25.
- Gleick J.
2011 *L'informazione. Una storia. Una teoria. Un diluvio*, tr. it. di V.B. Sala, Feltrinelli, Milano 2012.
- Godfrey-Smith P.
2016 *Altre menti. Il polpo e le remote origini della coscienza*, tr. it. di I. Blum, Adelphi, Milano.
- Godfrey-Smith P., Sterelny K.
2016 *Biological Information*, in E.N. Zalta (a cura di), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, plato.



Bibliografia

stanford.edu/archives/sum2016/entries/information-biological/.

Gombrich R.

2009 *Il pensiero del Buddha*, tr. it. di R. Donadoni, Adelphi, Milano 2012.

Gregory R.

1981 *La mente nella scienza*, tr. it. di M. e D. Paggio, CDE, Milano 1986.

Harshman N.L.

2016 *Physics of Information*, in L. Floridi (a cura di), *The Routledge Handbook of Philosophy of Information*, Routledge, London, pp. 7-14.

Hartley R.V.

1928 *Transmission of Information*, in "Bell System Technical Journal", vol. 7, n. 3, pp. 535-563.

Heaven D.

2019 *Deep trouble for deep learning. Artificial-intelligence researchers are trying to fix the flaws of neural networks*, in "Nature", 574, pp. 163-166.

Hebb D.

1980 *Mente e pensiero*, tr. it. di G. Farabegoli, il Mulino, Bologna 1982.

Heidegger

1950 *Il linguaggio*, in M. Heidegger, *In cammino verso il linguaggio*, tr. it. di A. Caracciolo e M. Caracciolo Perotti, Mursia, Milano 1973, pp. 27-44.

1954 *La questione della tecnica*, in G. Vattimo (a cura), *Saggi e discorsi*, Mursia, Milano 1976, pp. 5-27.

1957-1958 *L'essenza del linguaggio*, in M. Heidegger, *In cammino verso il linguaggio*, tr. it. di A. Caracciolo e M. Caracciolo Perotti, Mursia, Milano 1973, pp. 127-171.

Herculano-Houzel S.

2009 *The Human Brain in Numbers: A Linearly*



Filosofia dell'informazione biologica

Scaled-Up Primate Brain, in "Frontiers in Human Neuroscience", vol. 3: 31.

Herrnstein R.J.

1990 *Levels of Stimulus Control: A Functional Approach*, in "Cognition", vol. 37, pp. 133-166.

1979 *Acquisition, Generalization, and Discrimination Reversal of a Natural Concept*, in "Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Process", vol. 5, pp. 116-129.

Hodges A.

1983 *Alan Turing. Storia di un enigma*, tr. it. di D. Mezzacapa, Bollati Boringhieri, Torino 2012.

Hoffman D.

2020 *L'illusione della realtà. Come l'evoluzione ci inganna sul mondo che vediamo*, tr. it. di F. Pe', Bollati Boringhieri, Torino 2020.

Hoffmann P.M.

2012 *Gli ingranaggi di Dio. Dal caos molecolare alla vita*, tr. it. di A. Migliori, Bollati Boringhieri, Torino 2014.

Humphrey N.

2011 *Polvere d'anima. La magia della coscienza*, tr. it. di G. Maugeri, Codice, Torino 2013.

Hutten E.H.

1974 *La scienza contemporanea. Informazione, spiegazione e significato*, tr. it. di A. Verdino, Armando, Roma 1975.

Jacob F.

1970 *La logica del vivente. Storia dell'ereditarietà*, tr. it. di A. e S. Serafini, Einaudi, Torino 1971.

1981 *Il gioco dei possibili*, tr. it. di D. Garavini, Mondadori, Milano 1983.

Jakobson R, Waugh L.

1979 *La forma fonica della lingua*, tr. it. di F. Ravaz-





Bibliografia

zoli, E. Fava, M. Di Salvo e M. Mazzoleni, il Saggiatore, Milano 1984.

Janet P.

1928 *L'évolution de la mémoire et de la notion du temps*, Maloine, Paris.

Jerison H.

1973 *Evolution of the Brain and Intelligence*, Academic Press, New York.

Jiang L., Stocco A., Losey D.M., Abernethy J.A., Prat C.S., Rao RP

2019 *BrainNet: A Multi-Person Brain-to-Brain Interface for Direct Collaboration Between Brains*, in "Scientific Reports", vol. 9: 6115.

Jonas H.

1994 *Organismo e libertà*, tr. it. di A. Patrucco Becchi, Einaudi, Torino 1999.

Jung C.G.

1916 *Sette sermoni ai morti*, a cura di D. Curtotti, Edizioni Clandestine, Massa 2020.

Kandel E.

2015 *Dalle cellule nervose a i processi cognitivi: le rappresentazioni interne dello spazio e dell'azione*, in E. Kandel, J.H. Schwartz, T.M. Jessell, S.A. Siegelbaum, A.J. Hudspeth, *Principi di neuroscienze*, tr. it. di V. Perri e G. Spidalieri, Ambrosiana, Milano, pp. 370-390.

Kant I.

1790 *Critica del Giudizio*, a cura di M. Marassi, Bompiani, Milano 2015.

Kasthuri N., Hayworth K.J., Berger D.R., Schalek R.L., Conchello J.A., Knowles-Barley S., Lee D., Vázquez-Reina A., Kaynig V., Jones T.R., Roberts M.

2015 *Saturated Reconstruction of a Volume of Neocortex*, in "Cell", vol. 162, n. 3, pp. 648-661.



Filosofia dell'informazione biologica

Kauffman S.

2019 *Un mondo oltre la fisica. Nascita ed evoluzione della fisica*, tr. it. di S. Ferraresi, Codice, Torino 2020.

Kelly K.

2010 *Quello che vuole la tecnologia*, tr. it. di G. Olivero, Codice, Torino 2011.

Klein É.

2007 *Il tempo non suona mai due volte*, tr. it. di D. Damiani, Cortina, Milano 2008.

Knight A.F.

2025 *Why the Brain Cannot Be a Digital Computer: History-Dependence and the Computational Limits of Consciousness*, arXiv:2503.10518v1 [physics.hist-ph] 13 marzo 2025, pp 1-10.

Knill D., Pouget A.

2004 *The Bayesian Brain: the Role of Uncertainty in Neural Coding and Computation*, in "Trends in Neuroscience", vol. 27, pp. 712-719.

Kosso P.

1989 *Observability and Observation in Physical Science*, Kluwer, Dordrecht.

Koster-Hale J., Saxe R.

2013 *Theory of Mind: a Neural Prediction Problem*, in "Neuron", vol. 79, n. 5, pp. 836-848.

Koulakov A.A., Kolterman B.E., Enikolopov A.G., Rinberg D.

2011 *In Search of the Structure of Human Olfactory Space*, in "Frontiers in Systems Neuroscience", vol. 5: 65.

Lakoff G., Núñez R.

2000 *Da dove viene la matematica. Come la mente embodied dà origine alla matematica*, tr. it. di F. Ferrara e C. Sabena, Bollati Boringhieri, Torino 2005.

Bibliografia

Landauer R.

1991 *Information is Physical*, in "Physics Today", vol. 44, pp. 23-29.

Langer S.K.

1942 *Philosophy in a New Key: A Study in the Symbolism of Reason, Rite and Art*, Mentor Book, New York 1958.

Leavitt D.

2006 *L'uomo che sapeva troppo. Alan Turing e l'invenzione del computer*, tr. it. di C. Sargian, Codice, Torino 2016.

Lebedev M.A., Nicolelis M.A.

2017 *Brain-Machine Interfaces: From Basic Science to Neuroprostheses and Neurorehabilitation*, in "Physiological Reviews", vol. 97, n. 2, pp. 767-837.

Lecours A., Joannette Y.

1980 *Linguistic and Other Aspects of Paroxysmal Aphasia*, in "Brain and Language", vol. 10, pp. 1-23.

Leroi-Gourhan A.

1964 *Il gesto e la parola. Tecnica e linguaggio*, tr. it. di F. Zannino, Mimesis, Milano-Udine 2018.

1965 *Il gesto e la parola. La memoria e i ritmi*, tr. it. di F. Zannino, Mimesis, Milano-Udine 2018.

Lewis M.

2017 *Un'amicizia da Nobel. Kahneman e Tversky l'incontro che ha cambiato il nostro modo di pensare*, tr. it. di F. Peri, Raffaello Cortina, Milano 2017.

Lieberman P.

2013 *La specie imprevedibile. Ciò che rende unici gli esseri umani*, tr. it. di M. Mehmedovic, Carocci, Roma 2016.

Liverani M.

1988 *Antico Oriente (Le civiltà mesopotamiche)*, RCS Quotidiani, Milano 2004.



Filosofia dell'informazione biologica

Llinás Rodolfo

2001 *I of the Vortex: From Neurons to Self*, MIT Press, Cambridge.

Lo Piparo F.

2003 *Aristotele e il linguaggio. Cosa fa di una lingua una lingua*, Laterza, Roma-Bari.

Lombardi O., López C.

2021 *The Many Faces of Shannon Information*, in C. Meyns (a cura di), *Information and the History of Philosophy*, Routledge, New York, pp. 324-340.

Longo G.O.

1998 *Il nuovo Golem. Come il computer cambia la nostra cultura*, Laterza, Roma-Bari.

Longo G.O., Vaccaro A.

2013 *Bit Bang. La nascita della filosofia digitale*, Apogeo, Adria.

Luria S.

1973 *La vita: un esperimento non finito. "Homo sapiens" e nuova biologia*, tr. it. di A. Checchia e R. Coen Pirani, Zanichelli, Bologna 1974.

Manyika J. et al.

2019 *What Do We Do About the Biases in AI?*, in "Harvard Business Review", disponibile online: hbr.org/2019/10/what-do-we-do-about-the-biases-in-ai.

Maravita A., Spence C., Driver J.

2003 *Multisensory Integration and the Body Schema: Close to Hand and Within Reach*, in "Current Biology", vol. 13, n. 13: R531-9.

Marean C.W.

2015 *La più invadente di tutte le specie*, in "Le Scienze", vol. 566, pp. 33-41.

Markram H., Muller E., Ramaswamy S., Reimann M.W., Abdellah M., Sanchez C.A., Ailamaki A.,





Bibliografia

- Alonso-Nanclares L., Antille N., Arsever S., Kahou G.A.A.
2015 *Reconstruction and Simulation of Neocortical Microcircuitry*, in "Cell", vol. 163, n. 2, pp. 456-492.
- Martinet A.
1985 *Sintassi generale*, tr. it. di M. Rombi, Laterza, Roma-Bari 1988.
- Maturana H., Varela F.
1972 *Macchine ed esseri viventi. L'autopoiesi e l'organizzazione biologica*, tr. it. di A. Orellana, Astrolabio, Roma 1992.
1980 *Autopoiesi e cognizione*, tr. it. di A. Stragapede, Marsilio, Venezia 1985.
- Maynard Smith J., Szathmary E.
1995 *The Major Transitions in Evolution*, W.H. Freeman Spektrum, Oxford.
- Mayr E.
1997 *Il modello biologico*, tr. it. di A. Vezzaro, McGrawHill Education, Milano 2003.
- Mazzone M.
2005 *Menti simboliche. Introduzione agli studi sul linguaggio*, Carocci, Roma.
- McDermott J.H., Simoncelli E.P.
2011 *Sound Texture Perception Via Statistics of the Auditory Periphery: Evidence from Sound Synthesis*, in "Neuron", vol. 71, n. 5, pp. 926-940.
- Mehr S. A., Singh M., Knox D., Ketter D. M., Pickens-Jones D. et al.
2019 *Universality and diversity in human song*, in "Science", 366 (6468), 1-17.
- Metzinger T.
2009 *Il tunnel dell'io. Scienza della mente e mito del soggetto*, tr. it. di M. Baccarini, Raffaello Cortina, Milano 2010.





Filosofia dell'informazione biologica

Minkowski E.

1933 *Il tempo vissuto. Fenomenologia e psicopatologia*, tr. it. di G. Terzian, Fabbri, Milano 2004.

Moffatt B.

2016 *The Philosophy of Biological Information*, in L. Floridi (a cura di), *The Routledge Handbook of Philosophy of Information*, Routledge, London, pp. 277-289.

Monod J.

1970 *Il caso e la necessità. Saggio sulla filosofia naturale della biologia contemporanea*, tr. it. di A. Busi, Mondadori, Milano 1976.

Montagnini L.

2015 *Information versus Matter and Energy. La concezione dell'informazione in Wiener e le sue conseguenze sull'oggi*, in "Biblioteche oggi", settembre 2015, pp. 41-61.

Montague R.

2006 *Perché l'hai fatto? Come prendiamo le nostre decisioni*, tr. it. di L. Guzzardi, Raffaello Cortina, Milano 2008.

Moor J.

2006 *The Dartmouth College Artificial Intelligence Conference: The Next Fifty Years*, in "AI Magazine", vol. 27, n. 4, pp. 87-91.

Morel C.

2004 *Dizionario dei simboli, dei miti e delle credenze*, tr. it. di E. Crispino, Giunti, Firenze 2006.

Moreno-Bote R., Knill D.C., Pouget A.

2014 *Bayesian Sampling in Visual Perception*, in "Proceedings of the National Academy of Sciences", vol. 111, n. 12, E1377-E1386.



Bibliografia

Moro A.

2006 *I confine di Babele. Il cervello e il mistero delle lingue impossibili*, Longanesi, Milano.

Murray E.A., Wise S.P., Graham K.S.

2018 *Representational Specializations of the Hippocampus in Phylogenetic Perspective*, in "Neuroscience Letters", vol. 680, pp. 4-12.

Musser G.

2019 *Realtà virtuale*, in "Le Scienze", vol. 615, pp. 32-36.

Naccache L.

2020 *Le cinéma intérieur. Projection privée au coeur de la conscience*, Odile Jacob, Paris.

Nagel T.

1974 *Che cosa si prova ad essere un pipistrello*, tr. it. di T. Falchi, Castelvechi, Roma 2013.

Nicolelis M.

2011 *Il cervello universale. La nuova frontiera delle connessioni tra uomini e computer*, tr. it. di A. Panini, Bollati Boringhieri, Torino 2015.

Nicolelis M., Chapin J.

1994 *The Spatiotemporal Structure of Somatosensory Responses of Many Neuron Ensembles in the Rat Ventral Posterior Medial Nucleus of the Thalamus*, in "Journal of Neuroscience", vol. 14, pp. 3511-3532.

Nietzsche F.

1885-1887 *Frammenti postumi*, in Id., *Opere complete*, tr. it. di G. Colli e M. Montinari, Adelphi, Milano 2009.

Nurse P.

2020 *Che cos'è la vita. I cinque principi fondamentali della biologia*, trad. L. Serra, Mondadori, Milano, 2021.



Filosofia dell'informazione biologica

- Oatley K.
1978 *Percezione e rappresentazione*, tr. it. di G.P. Anzola, il Mulino, Bologna 1982.
- Odifreddi P.
2012 *Gödel e Turing. La nascita del computer e la società dell'informazione*, La Biblioteca di Repubblica, Roma.
- Orgel L.E.
2002 *The Origin of Biological Information*, in J.W. Schopf (a cura di), *Life's Origins. The Beginnings of Biological Evolution*, University of California Press, Berkely, pp. 140-157.
- Paradis M.
2009 *Declarative and Procedural Determinants of Second Languages*, Benjamins, Amsterdam.
- Parthasarathy R.
2022 *Un inizio così semplice. I quattro principi fisici alla base del mondo vivente*, tr. it. di D. Casula, Carrocci, Roma 2014.
- Pattee H.
2008 *Physical and Functional Conditions for Symbols, Codes, and Languages*, in "Biosemiotics", vol. 1, pp. 147-168.
- Pattee H.
2015 *Cell Phenomenology: The First Phenomenon*, in "Progress in Biophysics and Molecular Biology", vol. 119, n. 3, pp. 461-468.
- Pattee H., Rączaszek-Leonardi J.
2012 *Laws, Language and Life: Howard Pattee's Classic Papers on the Physics of Symbols with Contemporary Commentary*, Springer, New York.
- Peirce C.S.
1931-1935 *Collected Papers of Charles Sanders Peirce*, a cura di C. Harstone e P. Weiss, vol. II, Harvard University Press, Cambridge 1998.



Bibliografia

- Peng M., Jaeger S.R., Hautus M.J.
2015 *Determining Odour Detection Thresholds: A Rapid Method for Assessing Olfactory Sensitivity*, in "Food Quality and Preference", vol. 68, pp. 391-410.
- Pilley J.W., Reid A.K.
2011 *Border Collie Comprehends Object Names as Verbal Referents*, in "Behavioural Processes", vol. 86, n. 2, pp. 184-195.
- Pinker S.
1994 *L'istinto del linguaggio. Come la mente crea il linguaggio*, tr. it. di G. Origgi, Mondadori, Milano 1998.
- Pitkow X., Meister M.
2014 *Neural Computation in Sensory Systems*, n M.S. Gazzaniga, G.R. Mangun (a cura di), *The Cognitive Neurosciences*, MIT Press, Cambridge, pp. 305-318.
- Popper K.
1959 *Logica della scoperta scientifica*, tr. it. di M. Trincherò, Mondadori, Milano 2008.
- 1978 *Tre saggi sulla mente umana*, tr. it. di S. Benini, Armando, Roma 1994.
- 1985 *Congetture e confutazioni. Lo sviluppo della conoscenza scientifica*, tr. it. di G. Pancaldi, Fabbri, Milano 2004.
- Presacco A., Goodman R., Forrester L., Contreras-Vidal J.L.
2011 *Neural Decoding of Treadmill Walking from Noninvasive Electroencephalographic Signals*, in "Journal of Neurophysiology", vol. 106, n. 4, pp. 1875-1887.
- Prigogine I.
1979 *La nuova alleanza. Uomo e natura in una scienza unificata*, tr. it. di R. Morchio, Longanesi, Milano 1979.
- Reale G.
2007 *Introduzione a Eraclito. Testimonianze, imitazioni e frammenti. Con i testi greci*, a cura di R. Mondolfo, L. Tarán, M. Marcovich, Bompiani, Milano 2007.

Filosofia dell'informazione biologica

- Reid C.
1970 *Hilbert*, Springer-Verlag, New York.
- Revonsuo A.
2006 *Inner Presence: Consciousness as a Biological Phenomenon*, MIT Press, Cambridge (MA).
- 2010 *Consciousness, The Science of Subjectivity* Psychology Press, Hove.
- Reynolds A.S.
2022 *Understanding Metaphors in the Life Sciences*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Roger J.
1974 *Teoria dell'informazione e storia della vita*, in J. Roger (a cura di), *La teoria dell'informazione*, il Mulino, Bologna, pp. 221-240.
- Rogers B.
2017 *Percezione*, tr. it. di N. Aresca, Le Scienze, Roma 2019.
- Rosenfield I.
1992 *Lo strano, il familiare e il dimenticato. Un'anatomia della coscienza*, tr. it. di F. Bianchi Bandinelli, Rizzoli, Milano 1992.
- Rovelli C.
2017 *L'ordine del tempo*, Adelphi, Milano.
- Rumore P.
2025 *Le ragioni di Kant*, Solferino, Milano.
- Sapir E.
1921 *Il linguaggio. Introduzione alla linguistica*, tr. it. di P. Valesio, Einaudi, Torino 1969.
- Schacter D.
1996 *Alla ricerca della memoria. Il cervello, la mente, il passato*, tr. it. di C. Mannella, Einaudi, Torino 2001.
- Schaller S.
1991 *A Man Without Words*, University of California Press, Berkeley.

Bibliografia

Schrödinger E.

1944 *Che cos'è la vita? La cellula vivente dal punto di vista fisico*, tr. it. di M. Ageno, Adelphi, Milano 1995.

Schulte P.

2012 *How Frogs See the World: Putting Millikan's Teleosemantics to the Test*, in "Philosophia", vol. 40, pp. 483-496.

Scott-Phillips T.

2015 *Di' quello che hai in mente. Le origini della comunicazione umana*, tr. it. di A. Chiera, Carocci, Roma 2017.

Searle J.

1997 *Il mistero della coscienza*, tr. it. di E. Carli, Raffaello Cortina, Milano 1998.

2002 *Why I Am Not a Property Dualist*, in "Journal of Consciousness Studies", vol. 9, pp. 57-64.

2004 *La mente*, tr. it. di C. Nizzo, Raffaello Cortina, Milano 2005.

2019 *Il mistero della realtà*, tr. it. di P. Di Lucia, Raffaello Cortina, Milano 2019.

Seife C.

2006 *La scoperta dell'universo. I misteri del cosmo alla luce della teoria dell'informazione*, tr. it. di A. Migliori, Bollati Boringhieri, Torino 2007.

Selfslagh A., Shokur S., Campos D., Donati A., Almeida S., Yamauti S., Coelho D., Bouri M., Nicoletis M.

2019 *Non-invasive, Brain-controlled Functional Electrical Stimulation for Locomotion Rehabilitation in Individuals with Paraplegia*, in "Scientific Reports", vol. 9, n. 1: 6782.

Sen P.

2020 *Il frigorifero di Einstein. Come la differenza tra caldo e freddo spiega l'universo*, tr. it. di S. Boutlot, Bollati Boringhieri, Torino 2021.

- Senghas A.
2005 *Language Emergence: Clues from a New Be-
douin Sign Language*, in "Current Biology", vol. 15,
n. 12: R463-R465.
- Senghas A., Sotaro K., Özyürek A.
2004 *Children Creating Core Properties of Language:
Evidence from an Emerging Sign Language in Nicara-
gua*, in "Science", vol. 305, pp. 1779-1782.
- Seth A.
2019 *Il creatore della realtà*, in "Le Scienze", vol.
615, pp. 42-49.
- Seung S.
2012 *Connettoma. La nuova geografia della mente*, tr.
it. di S. Ferraresi, Codice, Torino 2016.
- Severino E.
2002 *Técne. Le radici della violenza*, Rizzoli, Milano.
2019 *Lezioni milanesi. Ontologia e violenza (2016-
2017)*, a cura di N. Cusano, Mimesis, Milano-
Udine.
- Shadlen M.N., Newsome W.T.
1998 *The Variable Discharge of Cortical Neurons:
Implications for Connectivity, Computation, and In-
formation Coding*, in "The Journal of Neuroscience",
vol. 18, n. 10, pp. 3870-3896.
- Shannon C., Weaver W.
1949 *The Mathematical Theory of Communication*,
The University of Illinois Press, Urbana (IL).
- Silvestrini V.
2011 *Che cos'è l'entropia. Ordine, disordine ed evo-
luzione dei sistemi*, Editori Riuniti University Press,
Roma.
- Simondon G.
1953 *Epistemologia della cibernetica*, in "aut aut",
vol. 377, 2018, pp. 12-35.

Bibliografia

1958 *L'individuazione. Alla luce delle nozioni di forma e d'informazione*, tr. it. di G. Carrozzini, Mimesis, Milano-Udine 2020.

Smolin L.

1997 *La vita del cosmo*, tr. it. di P.D. Napolitani, Einaudi, Torino 1999.

2013 *La rinascita del tempo. Dalla crisi della fisica al futuro dell'universo*, tr. it. di S. Frediani, Einaudi, Torino 2014.

Stokoe W.C.

1960 *Sign Language Structure: An Outline of the Visual Communication Systems of the American Deaf*, Studies in Linguistics: Occasional Papers, vol. 8, Dept. of Anthropology and Linguistics, University of Buffalo, Buffalo.

Taleb N.

2007 *Il cigno nero. Come l'improbabile governa la nostra vita*, tr. it. di E. Nifosi, il Saggiatore, Milano 2007.

Tang Y., Nyengaard J.R., De Groot D.M., Gundersen H.J.G.

2001 *Total Regional and Global Number of Synapses in the Human Brain Neocortex*, in "Synapse", vol. 41, n. 3, pp. 258-273.

Tattersall I.

2012 *I signori del pianeta. La ricerca delle origini dell'uomo*, tr. it. di A. Panini, Codice, Torino 2013.

Taylor C., Dewsbury B.N.

2018 *On the Problem and Promise of Metaphor Use in Science and Science Communication*, in "Journal of Microbiology and Biology of Education", vol. 19, n. 1, pp. 1-5.

Tegmark M.

2017 *Vita 3.0. Esseri umani nell'era dell'intelligenza artificiale*, tr. it. di V.B. Sala, Raffaello Cortina, Milano 2018.



Filosofia dell'informazione biologica

Tomasello M.

2014 *Unicamente umano. Storia naturale del pensiero*, tr. it. di M. Riccucci, il Mulino, Bologna 2014.

Tommaso d'Aquino

1996 *La somma teologica*, Edizioni Studio Domenicano, Roma.

Tulving E.

1985 *Memory and Consciousness*, in "Canadian Psychology", vol. 26, pp. 1-12.

2005 *Episodic Memory and Autonoesis: Uniquely Human?*, in S. Terrace Herbert, J. Metcalfe (a cura di), *The Missing Link in Cognition*, Oxford University Press, New York, pp. 4-56.

Turing A.

1950 *Computing Machinery and Intelligence*, in "Mind", vol. 59, n. 236, pp. 433-460.

Turner E.

2015 *Improbable Life: An Unappealing but Plausible Scenario for Life's Origin on Earth*, www.youtube.com/watch?v=Bt6n6Tu1beg.

Varshney L.R., Sjostrom P.J., Chklovskii D.B.

2006 *Optimal Information Storage in Noisy Synapses Under Resource Constraints*, in "Neuron", vol. 52, n. 3, pp. 409-423.

Varshney L., Chen B., Paniagua E., Hall D., Chklovskii D.

2011 *Structural Properties of the Caenorhabditis Elegans Neuronal Network*, in "PLoS Computational Biology", vol. 7, n. 2: e1001066.

Vespignani A. Rijtano R.

2019 *L'algoritmo e l'oracolo. Come la scienza predice il futuro e ci aiuta a cambiarlo*, il Saggiatore, Milano.

Vilares I., Kording K.

2011 *Bayesian Models: the Structure of the World, Uncertainty, Behavior, and the Brain*, in "Annals of





Bibliografia

the New York Academy of Sciences”, vol. 1224, n. 1, pp. 22-39.

Villarreal L.

2020 *I virus sono vivi?*, in “Le Scienze Dossier: Nemici invisibili”, settembre 2020, pp. 5-9.

Volterra V.

2004 *La lingua dei segni italiana. La comunicazione visivo-gestuale dei sordi*, il Mulino, Bologna.

von Baeyer H.C.

2003 *Informazione. Il nuovo linguaggio della scienza*, tr. it. di S. Bianchi, Dedalo, Bari 2005.

von Bartheld C.S., Bahney J., Herculano-Houzel S.

2016 *The Search for True Numbers of Neurons and Glial Cells in the Human Brain: A Review of 150 Years of Cell Counting*, in “Journal of Comparative Neurology”, vol. 524, n. 18, pp. 3865-3895.

von Foerster H.

1980 *Epistemology of Communication*, in K. Woodward (a cura di), *The Myths of Information: Technology and Postindustrial Culture*, Routledge, London, pp. 18-27.

1981 *Disordine/ordine: scoperta o invenzione*, in Id., *Sistemi che osservano*, tr. it. di B. Draghi, Astrolabio, Roma 1987, pp. 191-201.

von Neumann J.

1951 *La logica degli automi e la loro autoriproduzione*, in V. Somenzi (a cura di), *La filosofia degli automi*, Boringhieri, Torino 1965, pp. 222-245.

1958 *Computer e cervello*, tr. it. di P. Bartesaghi, il Saggiatore, Milano 2014.

1966 *Theory of Self-Reproducing Automata*, University of Illinois Press, Urbana.

Vygotskij L.

1934 *Pensiero e linguaggio. Ricerche psicologiche*, tr. it. di L. Meccacci, Giunti-Barbera, Firenze 2008.





Filosofia dell'informazione biologica

Wadley L., Sievers C., Bamford M., Goldberg P., Berna F., Miller C.

2011 *Middle Stone Age Bedding Construction and Settlement Patterns at Sibudu, South Africa*, in "Science", vol. 334, pp. 1388-1391.

Watson J.D.

1968 *La doppia elica. Il segreto della vita*, tr. it. di B. Vitale e M. Attardo Marini, Garzanti, Milano 2004.

Watson J., Crick F.

1953 *A Structure for Deoxyribose Nucleic Acid*, in "Nature", vol. 171, n. 4356, pp. 737-738.

Watzlawick P.

1977 *Il linguaggio del cambiamento*, tr. it. di L. Cornalba, Feltrinelli, Milano 1980.

Watzlawick P., Beavin J.H., Jackson D.D.

1967 *Pragmatica della comunicazione umana*, tr. it. di M. Ferretti, Astrolabio, Roma 1971.

Weber A.I., Saal H.P., Lieber J.D., Cheng J.W., Manfredi L.R., Dammann J.F., Bensmaia S.J.

2013 *Spatial and Temporal Codes Mediate the Tactile Perception of Natural Textures*, in "Proceedings of the National Academy of Sciences", vol. 110, n. 42, pp. 17107-17112.

Weil S.

1941 *L'Iliade o il poema della forza*, tr. it. di F. Rubini, Asterios, Trieste 2015.

Wheeler J.A.

1989 *Information, Physics, Quantum: The Search for Links*, in Id. (a cura di), *Proceedings III International Symposium on Foundations of Quantum Mechanics*, Tokyo, pp. 309-366.

Wiener N.

1948 *La cibernetica*, tr. it. di O. Beghelli, Bompiani, Milano 1953.



Bibliografia

- 1950 *Introduzione alla cibernetica: l'uso umano degli esseri umani*, tr. it. di D. Persiani, Bollati Boringhieri, Torino 1966.
- Windhorst U.
- 2008 *Sensory Systems*, in M.D. Binder, N. Hirokawa, U. Windhorst (a cura di), *Encyclopedia of Neuroscience*, Springer, Berlin, pp. 3653-3673.
- Wittgenstein L.
- 1914-1951 *Pensieri diversi*, tr. it. di M. Rachetti, Fabbri, Milano 2004.
- 1921 *Tractatus logico-philosophicus e Quaderni 1914-1916*, tr. it. di A.G. Conte, Einaudi, Torino 1997.
- Woese C.R.
- 1967 *The Genetic Code. The Molecular Basis for Gene Expression*, Harper and Row, New York.
- Young J.Z.
- 1964 *Un modello del cervello*, tr. it. di F. Cianfaloni, Einaudi, Torino 1974.
- 1987 *I filosofi e il cervello*, tr. it. di R. Valla, Bollati Boringhieri, Torino 1988.
- Zeilinger A.
- 1999 *A Foundational Principle for Quantum Mechanics*, in "Foundations of Physics", vol. 29, pp. 631-643.
- 2003 *Il velo di Einstein. Il nuovo mondo della fisica quantistica*, tr. it. di L. Lilli, Einaudi, Torino 2005.
- 2010 *La danza dei fotoni. Da Einstein al teletrasporto quantistico*, tr. it. di V.L. Gili, Codice, Torino 2012.
- Zentall T.R., Wasserman E.A., Urcuioli P.J.
- 2014 *Associative Concept Learning in Animals*, in "Journal of the Experimental Analysis of Behavior", vol. 101, n. 1, gennaio, pp. 130-151.



INDICE ANALITICO*

- acido desossiribonucleico (DNA), 6.1, 10.1
acido ribonucleico (RNA), 6.1
adenina, 6.1
Adrian E., 7.3
agenti coscienti, 8.5
aminoacidi, 6.2
area di Broca, 9.2, 9.3
area di Wernicke, 9.2, 9.3
Aristotele, 9.5, 9.6
attuatori meccanici, 7.8
autocoscienza, 8.3
- Bateson G., 5.1, 5.4, 7.3, 7.5, 10
Bell C., 7.5
Binary Digit, 4.2, 5.4
Bohr N., 5
Boltzmann L., 4.3
Boole G., 4.6
Brain-Machine Interface, 7.8
Buddha, 2
Bush V., 3
- Caenorhabditis elegans*, 7.1
canale vocale-uditivo, 9
- canali, 6
Cannon W.B., 3.2
canto glossolalico, 9.2
Chatin G., 4.2
Church A., 4.5
cibernetica, 3.1, 4.2
circuiti neuronali, 7.1
citosina, 6.1
codice binario, 4.1, 4.2, 4.3, 10
codice genetico, 6.2, 6.4, 10
codice lineare, 9.1
codice Morse, 4.1, 4.4, 10
codice, 4.1, 4.4
concetti, 8.2, 9.3
connettoma, 7.2
consonanti, 9.1
coscienza primaria, 8.3
Craig K. 8.1, 9.7
Creatura, 5.3, 7.5
Crick F. 1, 6.1, 8.5, 10
Cristianini N., 4.7
- Dante Alighieri, 9.7
darwinismo neuronale, 8.2
day dreaming, 9.5
Descartes R., 9.5

* I numeri riportati nell'indice analitico si riferiscono ai paragrafi del libro.

Filosofia dell'informazione biologica

- Dewey J., 9.5
doppia articolazione, 9
Dor D., 9
- Edelman G., 8.2
Einstein A., 8.5
entropia, 2, 4.2, 10.2
enzimi, 6
epifenomenismo, 8.3
Eraclito, 2
Escherichia coli, 5.2, 6.1, 6.3
exadattamento, 9.2
- feedback negativo, 2, 3.1, 6.3
Fernyhough C., 9.5
fonemi, 9.1
frasi, 9.1
Friston K., 8.4
Frith C., 10
futuro, 3.1, 8.1, 9.4
- Gardner H., 10
Gibbs J.W., 3
gioco, 10.1
grammatica 9.2, 9.3
Gregory R., 10
guanina, 6.1
gusto, 7.6
- hardware*, 4.5
Harshman N., 5
Hartley R., 4.2, 10
Heidegger M., 9.4, 9.8, 10.2
Hilbert D., 4.5
Hoffman D., 8.5
Hoffmann P.M., 2
- inferenza inconscia, 8.4
Intelligenza artificiale, 4.7, 10.2
- Jacob F., 2, 6.3, 8.5, 10.1
Jakobson R., 9.1
Janet P., 9.4
- Kahneman D., 9.6
Kant I., 5.3, 8.4
Kolmogorov A., 4.2
Kosso P., 5
- Landauer R., 5
languageless person, 9.5
Last Universal Common Ancestor (LUCA), 2, 5.2
Leroi-Gourhan A., 9.6
Lingua Nicaraguense dei Segni, 9.2
linguaggio interiore, 9.5
Longo G.O., 5.3, 5.4
Lorente de Nó R., 7.4
- machine learning*, 4.7
matematica, 4.4
Maxwell C., 4.3
Maynard Smith J., 6.4
Mayr E., 2
McCarthy J., 4.7
meccanica statistica, 3
memoria episodica, 9.3
memoria esplicita, 9.3
memoria implicita, 9.3
memoria procedurale, 9.3
memoria semantica, 9.3
Mental Time Travel, 9.3, 9.5
mente predittiva, 8.4
messaggio, 4.1

Indice analitico

Metzinger T., 8.5, 10
mind wandering, 9.5
Minsky M., 4.7
misurazione, 8.1
Monod J., 6.3, 10
Montague R., 7.7
Müller J., 7.5

neurotrasmettitori, 7.1
Nicolelis M., 7.4
Nietzsche F., 5.1
nucleotidi, 6.1

Oatley K., 8.2
olfatto, 7.6
omeostasi, 3.2, 8.1
organizzazioni topologi-
che, 8.2

parole, 9.1
passato, 9.3
Patee H., 6.4
pensiero, 9.5
percezione, 8.2
personal computer, 7.7
Pleroma, 5.3, 7.5
pompe, 6
Popper K.
potenziale d'azione (*spi-
ke*), 7.3, 7.5
potenziale di riposo, 7.3
presente, 8.3, 9.4
Prigogine I., 2
proteine, 6.2

Radar, 3.1
realismo cosciente, 8.5
recettori sensoriali, 7.5
recettori, 6

reti neurali, 4.7
ricorsività, 9.1
rivoluzione cognitiva, 9.2
robot, 7.8
Roger J., 1

Sapir E., 9.1
scena complessa, 8.3
Schrödinger E., 1, 10.2
Searle J., 8.2
segnali, 4.1, 9
segno, 4.1, 4.4, 10.1
semantica, 4.1, 4.4, 9.1,
9.3

Severino E., 10.2
Shannon C., 4, 4.1, 4.6, 10
simbolo, 4.1, 4.4, 8.1, 9,
10.1

Simondon G., 5.3
sinapsi, 7.1, 7.6
sintassi, 9.1
sistema di riconoscimento,
8.2

Sistema Internazionale
delle Grandezze Fisi-
che, 5.4

sistemi sensoriali, 7.5
Smolin L., 4.4, 8.5, 9.8
software, 4.5

sogno, 8.4
sonno a onde lente, 7.4
sonno paradossoso, 7.4
sonno, 7.4
sordomuti, 9.5
storie, 9.1, 9.4
Szathmáry E., 6.4

Taddio L. 10
Taleb N., 9.6

Filosofia dell'informazione biologica

- tatto, 7.6
tecnologia, 10.2
telegrafo, 4.1
teorema di Bayes, 8.4
teoria dell'inferenza attiva,
 8.4
teoria della mente, 9.4
teoria predittiva, 3.1, 8.4
termostato, 3.2
timina, 6.1
Tomaso D'Aquino, 9.5
trasduzione sensoriale, 7.5
tratto vocale sopra-larin-
 geo, 9
Turing A., 4.5, 4.7, 10
Tversky A., 9.6

uracile, 6.1

veglia, 7.4

verità, 9.6
vista, 7.6
vocali, 9.1
von Baeyer H., 5
von Foerster H., 4.3
von Helmholtz H. 8.4
von Neumann J., 4.6, 10
Vygotskij L., 9.5

Watson J., 1, 6.1, 10
Weaver W., 4
Wheeler J.A., 5, 6.4
Wiener N., 3.1, 4.2, 5, 10
Wittgenstein L., 1, 4.3,
 9.6, 9.8

Young J.Z., 10

Zeilinger A., 5
Zotterman Y., 7.3

PICCOLA BIBLIOTECA

- 1 Emanuele Severino, *Lezioni milanesi. Il nichilismo e la terra* (2015-2016)
- 2 Ernst Bloch, *Avicenna e la sinistra aristotelica*
- 3 Marc Augé, *Condividere la condizione umana*
- 4 Emanuele Severino, *Lezioni milanesi. Ontologia e violenza* (2016-2017)
- 5 Hannah Arendt, *La lingua materna. La condizione umana e il pensiero plurale*
- 6 Peter Sloterdijk, *Il quinto "Vangelo" di Nietzsche. Del miglioramento della Buona Novella*
- 7 Theodor W. Adorno, *L'attualità della filosofia. Tesi delle origini del pensiero critico*
- 8 Mauro Ceruti e Francesco Bellusci, *Abitare la complessità. La sfida di un destino comune*
- 9 Friedrich Nietzsche, *Plato amicus sed. Introduzione ai Dialoghi platonici*

Finito di stampare
nel mese di ??? 2026
da Digital Team – Fano (PU)