

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Biomedica

Tesi di Laurea

NEURONI E QUBIT

STORIA DI UN DIFFICILE PARALLELISMO

Relatore

Prof Giulio Peruzzi

Laureando

Valerio Nucera, 1195664

Anno Accademico 2021/2022

*Ai miei genitori
a Carlo
a Irina*

INDICE

INTRODUZIONE	1	
1	Dissezioni, percettroni, automi	5
1.1	Antichità e suggestioni elettriche	5
1.2	Processi elettrochimici	5
1.3	Cibernetica	6
1.4	Percettroni e automi	7
2	Dai bit ai qubit	11
2.1	Crisi dei fondamenti	11
2.2	Macchine di Turing	13
2.3	Verso una computazione quantistica	14
2.4	Qubit	15
2.4.1	Parallelismo	16
2.5	Complessità e cervello	17
3	Processi quantomeccanici nel cervello animale	19
3.1	Migrazioni e magnetoricezione	19
3.2	Il senso dell'olfatto nella Drosophila	21
3.3	Orch-OR	22
3.4	Molecole di Posner	23
4	Conclusioni	25

Bibliografia

INTRODUZIONE

Nel febbraio del 1943, in una Dublino bombardata pochi anni prima dalla Luftwaffe, Erwin Schrödinger tenne tre lezioni dal titolo "What is Life?" presso il Trinity College, con gran favore di pubblico ("Dubliners are proud to have a Nobel prize winner living among them", commentò il Times [1]). L'argomento delle conferenze era una audace discussione di problemi biologici visti sotto le lenti della termodinamica e della giovanissima (ancora nemmeno ventenne) meccanica quantistica. Le idee di quelle lezioni sarebbero confluite in un libretto omonimo l'anno seguente ed ebbero una grande influenza sugli sviluppi della biologia molecolare, risultando fonte di ispirazione per gli studi sul DNA di Franklin, Watson e Crick. Né le riflessioni di Schrödinger erano isolate: si pensi a quelle di Bohr (*Biology and atomic physics* del 1937, come anche *Light and life revisited*), Max Delbrück (*A Physicist Looks at Biology*) o Pascual Jordan (*Physics and the Secret of Organic Life*). Questi lavori pionieristici segnavano un nuovo modo di guardare alla biologia, utilizzando le enormi potenzialità della formulazione quantomeccanica per tentare di esplorare il divario tra vita e materia. La meccanica quantistica, grazie al suo carattere fondamentale e alla scala su cui agiva, si poneva allora per la prima volta come uno strumento utile ad indagare fenomeni estremamente complessi, quali quelli biologici.

Il 1943 era dunque iniziato con le conferenze di Schrödinger a Dublino, ma non era ancora finito: nel dicembre di quello stesso anno, McCulloch e Pitts (rispettivamente: neurofisiologo e matematico statunitensi) diedero alle stampe un articolo scritto a quattro mani: "A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity". Si trattava del primo lavoro pionieristico sulle reti neurali, volto a mostrare come il neurone fosse l'unità logica del cervello. Era un traguardo importante, figlio dei suoi tempi: lo studio del cervello come astrazione di una macchina elettrica di cui fosse possibile modellizzare il circuito. Malgrado la densa notazione del formalismo di Carnap (di cui Pitts era stato allievo) l'articolo contribuì ad accendere l'entusiasmo per la nascente cibernetica di Wiener: ci si poneva il problema di come studiare il cervello umano tramite le nuovi lenti tecnologiche dei calcolatori elettronici. E per quanto tali lenti ci appaiano oggi rivoluzionarie, esse erano ai tempi ancora in fasce: la macchina di Turing è del 1936, e più in generale i primi lavori legati alla computazione avevano un carattere fortemente teorico e influenzato dalla logica matematica.

Comprensibilmente, dunque, gli iniziali entusiasmi della cibernetica vennero meno quando ci si cominciò a rendere conto dell'effettiva complessità computazionale del cervello umano, che non aveva speranze di essere affrontata dai computer dell'epoca. Von Neumann, il cui ultimo lavoro fu *The computer and the brain*, espresse il suo scetticismo sulla possibile modellizzazione del cervello tramite l'approccio di McCulloch e Pitts, in quanto un tale modello sarebbe risultato «troppo grande per rientrare nell'universo fisico» [2]. Lo stesso McCulloch concluse laconicamente: «Non vi è possibilità che si riesca addirittura per l'intera corteccia» [2].

La ricerca tecnologica stava però per accelerare bruscamente, e l'osservazione di von Neumann che un computer fosse ben più grande di un cervello e avesse meno componenti non sarebbe stata vera ancora per molto. L'invenzione del transistor ebbe come conseguenza

l'abbandono delle vecchie, ingombranti valvole termoioniche e una incessante corsa alla miniaturizzazione, matematicamente descritta dalla legge di Moore. Ad oggi il più piccolo transistor costruito è un modello prodotto da IBM nel maggio 2021, grande appena 2 nanometri. Per fare un paragone di interesse notevole: un filamento di DNA umano ha un diametro di circa 2.5 nanometri. Se la legge di Moore continuerà a valere, dunque, non si potrà più prescindere dal considerare gli effetti quantistici - da un certo punto in poi - nelle nuove generazioni di transistor.

Malgrado i progressi tecnologici della miniaturizzazione, tuttavia, dall'ambiente scientifico seguirono ancora valide obiezioni dopo quelle di Von Neumann. Nel 1979 *Scientific American* pubblicò un articolo firmato dalla penna di Francis Crick, "Riflessioni sul cervello", in cui il premio Nobel osservava:

Purtroppo l'analogia fra un calcolatore e il cervello, pur essendo utile per certi aspetti, può facilmente essere fuorviante. In un calcolatore l'informazione viene elaborata molto rapidamente e in serie. Nel cervello la velocità di elaborazione è molto minore, ma l'informazione può passare per milioni di canali in parallelo [3].

Appena due anni dopo Richard Feynman preconizzò la computazione quantistica in *Simulating Physics with Computers*, seguito pochi anni dopo, nel 1985, dai risultati di Deutsch sulle macchine di Turing quantistiche. Era l'avvento di un nuovo paradigma computazionale "intrinsecamente parallelo" [4] che facendo leva su alcuni principi cardine della meccanica quantistica (sovrapposizione degli stati, entanglement) riusciva in alcuni casi specifici ad abbattere la complessità esponenziale delle computazioni classiche.

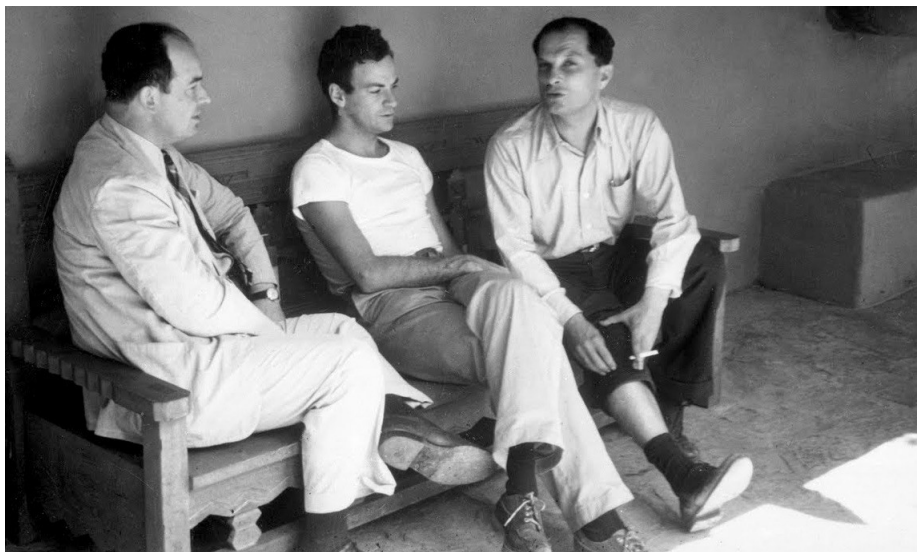


Figura 1: Da sinistra a destra: John von Neumann, Richard Feynman, Stanislaw Ulam. Foto tratta dagli Emilio Segrè Visual Archives dell'American Institute of Physics

Oggi, a distanza di quarant'anni, il quantum computing è un ambiente di ricerca florido e in continuo sviluppo: si pensi al Q System One, il primo computer quantistico ad uso commerciale sviluppato nel 2019 da IBM, o al processore Sycamore a 53 qubit tramite il quale Google ha rivendicato su *Nature* il primato di supremazia quantistica¹.

¹ «Our Sycamore processor takes about 200 seconds to sample one instance of a quantum circuit [...] the

In virtù delle potenzialità offerte dalla computazione quantistica una parte di letteratura scientifica ha discusso negli ultimi decenni, in modi più o meno controversi, di analogie tra cervello e macchine di Turing quantistiche. È scopo di questa tesi ripercorrere storicamente le tappe e le motivazioni del percorso finora tracciato, valutando con prudenza entro quali limiti queste analogie possono reggere. Nel primo capitolo viene presentata una storia della neurofisiologia umana e dei primi modelli di reti neurali artificiali. Successivamente si prosegue, nel secondo capitolo, con la crisi dei fondamenti nella logica del '900 e con le macchine di Turing classiche e quantistiche. Si illustra inoltre il problema della complessità computazionale e i limiti entro i quali operano i computer quantistici. Nel terzo capitolo si offre una panoramica delle ricerche e delle proposte inerenti a processi quantomeccanici nel cervello animale e umano, tra cui notevolmente quelle riguardanti la magnetoricezione nei fenomeni migratori di alcuni animali e gli studi sulle molecole di Posner. Nelle conclusioni si inquadrano i problemi NP completi nel contesto neurobiologico delle interconnessioni neuronali e del folding proteico nelle sinapsi, e si accenna infine all'emergente quantum machine learning e alle possibili applicazioni biomediche dei *quantum dots*.

Quando Richard Feynman morì nel 1988, sulla sua lavagna al Caltech aveva lasciato scritto: «What I cannot create, I do not understand» [6]. La speranza è dunque che la creazione di nuovi modelli via via più accurati del nostro cervello permetta di chiarire ulteriormente il suo funzionamento.

equivalent task for a state-of-the-art classical supercomputer would take approximately 10,000 years» [5]. Tale affermazione è stata tuttavia sottoposta a giudizio critico.

1 DISSEZIONI, PERCETTRONI, AUTOMI

Il ruolo dell'analogia nella creazione di modelli è pervasivo nella storia della scienza. Maxwell osservava a tal proposito che contaminazioni trasversali tra idee apparentemente distanti costituiscono, di fatto, una «fertilizzazione incrociata delle scienze» [7]. Ed è proprio questo filo conduttore, come si vedrà, a permettere una lettura ragionata della storia della neurofisiologia.

1.1 ANTICITÀ E SUGGERZIONI ELETTRICHE

I primi studi sul cervello che oggi guardiamo come rilevanti da un punto di vista scientifico si devono ad Andrea Vesalio, nella prima metà del sedicesimo secolo. Prima della pubblicazione del suo *De Humani Corporis Fabrica* (1542) c'è di fatto ben poco: le teorie medievali sul cervello erano pesantemente condizionate dal pensiero di Aristotele e Galeno. Soffrono di questo *ipse dixit* anche i primissimi lavori di anatomia, come ad esempio l'*Anatomia Mundini* (1316) del bolognese Mondino de Liuzzi. Nell'ultimo libro del suo trattato, dedicato allo studio del cervello, Vesalio mostra invece l'assenza della rete mirabile di Galeno, per mezzo di dissezioni autoptiche accuratamente illustrate (fig. 2a). L'eco internazionale del *De Humani Corporis Fabrica* si tradusse in un nuovo modo di approcciare la medicina in generale, e la neurofisiologia in particolare. Scrive Niccolò Stenone, un secolo dopo (1669): «essendo il cervello una macchina non dobbiamo sperare di scoprire i suoi trucchi con modi diversi da quelli usati per scoprire i trucchi di altre macchine» [2].

I "pneumi psichici" della medicina galenica lasciarono dunque posto ad una concezione sempre più meccanicistica del cervello, facendo così gradualmente emergere quelle analogie cui si accennava in apertura. Si pensi ad esempio al cervello modellizzato come una serie di migliaia di batterie (fig. 2b) negli *Elements of Electro-Biology* (1849) di Alfred Smee, cinquant'anni dopo la scoperta della pila da parte di Volta; oppure ai nervi motori, cerebrali e spinali paragonati da Johannes Müller ai tasti di un pianoforte, nei suoi *Elements of Physiology* del 1842. Alla scuola di Müller si formarono nomi che sarebbero poi diventati importanti nell'ambito della medicina e delle neuroscienze, come quelli - per citarne alcuni - di Theodor Schwann, Hermann von Helmholtz e Emil Du Bois-Reymond. In particolare quest'ultimo, proseguendo i suoi lavori sui pesci elettrofori, condusse studi pionieristici di neuroelettrofisiologia. Si era a metà del 1800: i modelli del cervello stavano cominciando ad abbandonare suggestioni meccaniche in favore di quelle elettriche: meno di cinquant'anni dopo la *Grammar of Science* di Pearson avrebbe descritto analogie fra l'attività cerebrale e la comunicazione telefonica via cavo.

1.2 PROCESSI ELETTROCHIMICI

Grazie ad alcune notevoli innovazioni tecnologiche (l'amplificatore elettronico, l'oscillografo, le apparecchiature di registrazione, in seguito l'elettroencefalogramma), gli studi sulla natura elettrica del segnale nervoso fecero notevoli passi in avanti. Nel 1921 Adrian riuscì a misurare il potenziale di azione di un nervo utilizzando un elettrometro capillare, e

Hodgkin e Huxley - analogamente - condussero esperimenti simili sugli assoni giganti del calamaro.

La causa alla base di tali potenziali elettrici era da poco stata oggetto di indagini: nel 1914 Hodgkin aveva proposto che ioni potassio e sodio avessero un ruolo centrale nella formazione dei potenziali a riposo e di azione. Gli studi di neurobiologia che ne seguirono aprirono orizzonti ancora più vasti di ricerca: affiancati ai fenomeni elettrici cominciavano a figurare quelli chimici (differenze di concentrazioni ioniche, neurotrasmettitori, neuroormoni, etc). Oggi sappiamo che le sinapsi degli interneuroni possono avere natura sia chimica che elettrica (a seconda del tipo di segnale trasmesso dalla cellula presinaptica alla postsinaptica), tuttavia ciò non era affatto chiaro negli anni '30. La teoria predominante all'epoca favoriva la trasmissione (puramente) elettrica del segnale nervoso. Pertanto la componente chimica si potè fare strada solo a seguito delle ricerche sull'acetilcolina di Dale e Loewi («era perciò dimostrato [...] che il risultato immediato della stimolazione nervosa è la liberazione di sostanze chimiche» [8]). Nuove ricerche portarono poi a un'ulteriore notevole analogia, questa volta di ispirazione quantomeccanica: a metà Novecento Katz propose il modello quantizzato dell'acetilcolina, secondo cui il neurotrasmettitore viene rilasciato alle sinapsi in pacchetti discreti. Gli valse il nobel nel 1970.

1.3 CIBERNETICA

Se da un lato, come dunque si è visto, la neurofisiologia ha tratto ispirazione per i suoi modelli da vari risultati di scienza e tecnica, d'altro canto è anche valso il viceversa, e cioè: gli studi dei neurofisiologi su neuroni e sinapsi hanno contribuito a ravvivare, in matematici e scienziati, sogni computazionali mai davvero sopiti da Leibniz in poi. In un breve lasso di tempo attorno agli anni '50 ci si cominciò ad interessare ad una disciplina che Norbert Wiener avrebbe poi chiamato "cibernetica", in omaggio a un articolo di Maxwell del 1868 intitolato "On governors"¹. Era lo spirito dei tempi, ubiquo: idee simili nacquero in luoghi diversi, all'incirca negli stessi anni e con formalismi più o meno distanti. Ci furono diversi precursori della cibernetica (Kenneth Craik, Štefan Odobleja), ma fu con Wiener che si ebbe una prima forma matematicamente rigorosa e coerente di idee rimaste fino ad allora piuttosto fumose (una su tutte, ad esempio, la formalizzazione dei sistemi di controllo a retroazione). Attorno a Wiener si raccolse in breve tempo un ventaglio di intellettuali interessati - per ciò che concerne questa tesi - ai problemi del cervello da diverse angolazioni e per diversi motivi. Ed è in questo ambiente poliedrico della Chicago del 1940, che un neurofisiologo e un matematico - Warren McCulloch e Walter Pitts - collaborarono alla stesura di quello che è il primo lavoro sulle reti neurali artificiali: "A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity".

Per capire il contesto in cui si collocano le idee di McCulloch e Pitts, due sono i risultati principali da richiamare. Anzitutto gli studi di istologia che valsero il nobel a Golgi e Cajal a inizio Novecento, in quanto ebbero un'importanza fondamentale nell'individuare il neurone come unità funzionale del sistema nervoso e mostrarono graficamente le connessioni neuronali. In secondo luogo è utile ricordare alcuni studi sul potenziale d'azione condotti da Edgar Adrian, che avevano ai tempi appena una trentina d'anni. Tali ricerche possono essere riassunte nella legge "del tutto o nulla" per la propagazione del potenziale d'azione,

¹ "Governor" è la versione latinizzata del termine greco "kubernetes" (nocchiero), da cui il termine scelto da Wiener: "cibernetica" [7].

la quale già nella sua prima formulazione mostrava come il segnale nervoso seguisse una logica binaria.

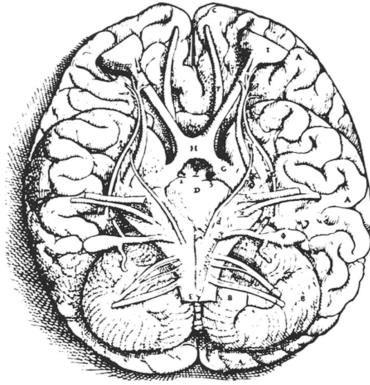
Il parallelismo con la logica binaria dei nascenti calcolatori elettronici non era caduto inosservato, anzi era stata una ulteriore analogia cervello-macchina molto apprezzata dallo stesso Wiener. McCulloch e Pitts mostrarono che una rete neuronale, pur nelle sue ovvie semplificazioni, può essere descritta formalmente dall'algebra di Boole (fig. 2c). Il loro articolo si conclude con un certo ottimismo meccanicistico circa i processi neurali: «Gli aspetti sia formali che finali di quell'attività che vogliamo chiamare mentale sono deducibili rigorosamente dalla neurofisiologia attuale» [2]. Ottimismo condiviso in modo più o meno trasversale da altri scienziati; Shannon ad esempio ricordava come la simulazione del cervello umano apparisse a lui e Turing un problema risolvibile in una decina d'anni:

Avevamo dei sogni, Turing e io eravamo soliti discorrere della possibilità di simulare per intero il cervello umano; avremmo realizzato un computer che fosse equivalente al cervello umano o addirittura molto migliore? E sembrava più facile di quanto non sembri oggi, forse. Pensavamo entrambi che sarebbe stato possibile in un tempo non molto lungo, dieci o quindici anni. Ma non è andata così [2].

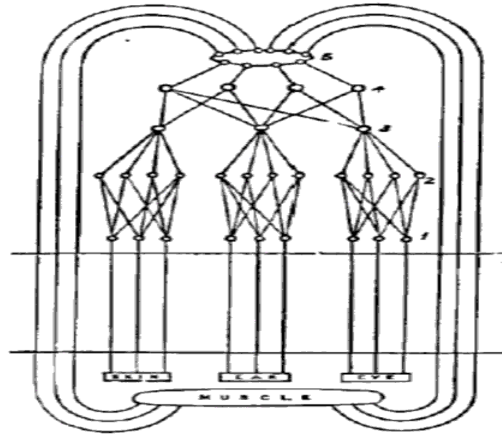
1.4 PERCETTRONI E AUTOMI

Il perceptrone, un modello alternativo al neurone artificiale di McCulloch e Pitts, venne proposto nel 1958 da Rosenblatt e fu poi oggetto di ulteriori studi da parte di Marvin Minsky. A differenza del neurone di McCulloch e Pitts, il perceptrone può lavorare su valori non booleani dove a ogni connessione in input è associato un peso. La somma pesata delle varie connessioni attiva il segnale nervoso se viene superata una certa soglia prestabilita.

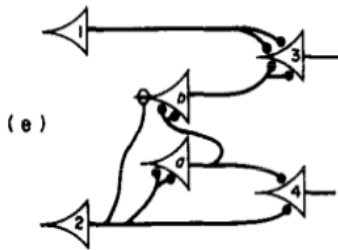
Una volta modellizzati i neuroni restavano da studiare le loro interconnessioni, e proprio da questa necessità nacquero le reti neurali artificiali (mentre alla mappatura vera e propria dei neuroni nel cervello si sarebbe poi dato il nome di "connettoma"). Ai fini di quanto vedremo in seguito per ciò che riguarda il cervello animale, è sufficiente qui osservare che una semplice rete neurale consiste in genere, oltre che delle già viste connessioni pesate, di tre livelli neurali: un livello di input che raccoglie i dati forniti alla rete, un layer cosiddetto "nascosto" che attiva o meno varie subunità a seconda dei pesi sinaptici e dei valori di soglia, ed infine un livello esterno di output (fig. 2d). Nell'ambito delle neuroscienze questo modo di procedere ha goduto di un certo successo pur soffrendo della miopia di una maggiore visione d'insieme, per via della sua natura programmaticamente riduzionista. I notevoli risultati del connessionismo (che, ad esempio, evita l'effetto collo di bottiglia di von Neumann) hanno infatti dovuto confrontarsi con inevitabili semplificazioni dell'effettiva fisiologia cerebrale. Gradualmente, dopo i primi entusiasmi della cibernetica, ci si cominciò a rendere conto che il cervello umano aveva una complessità che era stata fino ad allora sottovalutata. Il binomio computer-cervello cominciò dunque a vacillare sotto il sospetto che si potesse in fondo trattare di uno degli idola di Bacone, più che di una analogia vincente. In tal senso ad esempio si espresse Francis Crick, che sottolineando come l'informazione nel cervello venga elaborata in parallelo e non in serie, come in un computer, parlò di "analogia fuorviante" [3]. Alla conferenza di cibernetica del 1950 Ralph Gerard mise in guardia da facili ottimismo sull'analogia mente-macchina, osservando che il



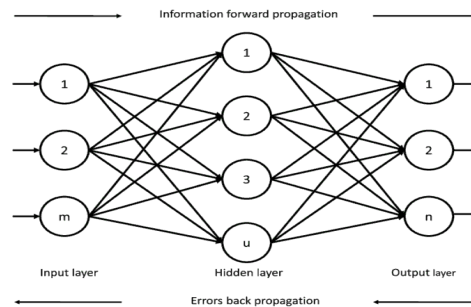
(a) Rappresentazione del cervello tratta dal *De Humani Corporis Fabrica* di Vesalio



(b) Alfred Smees, *Elements of Electro-Biology*; le due linee orizzontali individuano tre sezioni: quella più in alto è sede delle connessioni interne al cervello, quella mediana rappresenta i nervi, l'ultima le connessioni con gli organi sensoriali e i muscoli. Disegno tratto da [2]



(c) Interconnessioni neurali modellizzate come mappe booleane nell'articolo di McCulloch e Pitts. Particolare tratto dal loro articolo del 1943



(d) Rete neurale a 3 layer, come riportata in un articolo di Luo et al. (DOI:10.1186/s41044-018-0036-x)

Figura 2: Evoluzione delle rappresentazioni del cervello e dei neuroni

segnale nervoso è analogico a differenza dei segnali digitali usati per simulare reti neurali [2], mentre il neurofisiologo J.Z.Young concludeva, nella Reith Lecture di quello stesso anno:

Il cervello ha un numero persino maggiore di cellule di quante siano le valvole di un calcolatore e non è impossibile che agisca proprio come una macchina delle addizioni, in qualche modo [...] Tuttavia, ancora non sappiamo esattamente come il cervello archivi le proprie regole né come confronti con esse il segnale in ingresso. Potrebbe usare principi differenti da quelli di queste macchine [2].

Una critica ancora più fondamentale, tuttavia, non fu sollevata dai neurofisiologi. In *The computer and the brain*, pubblicato postumo nel 1958, John von Neumann osservò che le strutture logiche dei calcolatori non apparivano paragonabili a quelle dei segnali nervosi:

[...]there exist here different logical structures from the ones we are ordinarily used to in logics and mathematics[...] the outward forms of our mathematics are not absolutely relevant from the point of view of evaluating what the

mathematical or logical language truly used by the central nervous system is.

[9]

Le cause di ciò apparivano a von Neumann dipendere da un certo grado di stocasticità che egli riteneva inevitabile nella descrizione formale di un cervello organico. Si trova traccia di queste riflessioni in *Theory of Self-Reproducing Automata*, opera in cui sia computer («*artificial automata*») che cervelli («*natural automata*») vengono descritti in uno stesso framework generale. Le differenze strutturali (pur presenti) fra i due tipi di automi vengono fondamentalmente ricondotte da von Neumann a:

1. un problema della stabilità dei *natural automata*

«*natural automata are more parallel in operation, digital computers more serial*» [10] scrive, quindi suppone che il cervello risolva tramite architettura parallela l'esplosione combinatoria (indicata come «*logical depth*») che si avrebbe con una architettura seriale. Tuttavia per risolvere il problema della propagazione a cascata del rumore ipotizza una qualche forma di auto-stabilizzazione: «*Depth introduced by feedback in the human brain may be overcome by some kind of self-stabilization*» [10].

2. la caratteristica di riparazione dei processi biologici

I cervelli, osserva von Neumann, differiscono dai computer nell'aver processi di riparazione: «*Natural automata are clearly superior to artificial ones in this regard, for they have strong powers of self-diagnosis and self-repair*» [11] e ancora, quindi: «*the nervous system seems to be somewhat more flexibly designed [as] deep differences in the basic organizational principles are probably present*» [10].

Come osserva Stephen W. Kercel, dunque: «*Given these two properties, stability of some unusual character, and self-repair, [...] He [von Neumann] expected that logic to be probabilistic in character, and expected that this would be necessary because the brain is somehow inherently stochastic*» [10]. Per una opportuna descrizione dell'ipotetica logica seguita da un cervello, conclude allora von Neumann, la logica binaria dei calcolatori non è sufficiente. E nel capitolo di *Theory of Self-Reproducing Automata* dedicato alle teorie statistiche dell'informazione osserva:

There is reason to believe that the kind of formal logical machinery we will have to use [...] will be closer to analysis, because all axioms are likely to be of a probabilistic and not of a rigorous character. Such a phenomenon has taken place in the foundation of quantum mechanics [11].

Nel prossimo capitolo, dunque, si contestualizzerà lo stato dell'arte di logica matematica e computazione ai tempi di von Neumann (che in entrambi i campi fu testimone d'eccezione), per poi seguire l'evoluzione della computazione sui più recenti binari del quantum computing.

2 DAI BIT AI QUBIT

2.1 CRISI DEI FONDAMENTI

Come si è visto, von Neumann giunse infine a mettere in discussione l'identità tra la logica dei calcolatori e una (ipotetica) logica seguita dal sistema nervoso centrale. Questo modo di procedere incarnava bene lo spirito dei tempi: la logica, usata come candela per fare luce sui processi algoritmici, si stava infatti affermando come anello di congiunzione fra matematica e tecnologia, fra speculazioni teoriche e applicazioni fisiche. È allora opportuno contestualizzare, per quanto brevemente, il milieu culturale da cui gemmò la cosiddetta terza rivoluzione industriale. Tale terreno di coltura aveva un carattere marcatamente teorico: in effetti la teoria della computazione che iniziò a muovere i primi passi verso la fine degli anni '30 con Turing, Church e con lo stesso von Neumann (solo per citare i nomi più importanti) ebbe la sua gestazione in un periodo di profondi tumulti strutturali nati in seno alla comunità matematica nei primi decenni del 1900. Tale «crisi dei fondamenti» - come venne poi chiamata - si manifestò inizialmente con una pluralità di approcci metodologici molto distanti fra loro (perché in realtà meta-matematici) nel fondare la matematica in modo rigoroso. La logica contribuì ad aprire la crisi e fu di certo anche ciò che la concluse: la scuola del «logicismo» (Frege, Russell, Whitehead) si era prefissa di fondare riduzionisticamente la matematica su basi logiche. Aveva toccato un nervo scoperto della teoria cosiddetta "ingenua" degli insiemi di Cantor, mettendone in evidenza delle antinomie autoreferenziali (l'insieme di tutti gli insiemi, i cosiddetti paradossi, etc) che propose di epurare con la teoria dei tipi¹. I mastodontici *Principia* di Russell e Whitehead furono gli eredi intellettuali del pensiero di Frege, ma il tentativo di rimuovere sistematicamente ogni possibile antinomia risultò formalmente molto arduo. Parallelamente lo scontro sui transfiniti proposti da Cantor aveva finito con il polarizzare l'ambiente accademico: notabilmente mentre Kronecker dichiarava di non sapere se a predominare nella teoria di Cantor fosse la filosofia o la teologia (ma certo non la matematica) [12], David Hilbert si faceva garante del «paradiso che Cantor ha creato per noi» [13]. Vicini alla posizione di Kronecker troviamo intellettuali come Poincaré, Hermann Weyl e soprattutto Brouwer, il capofila di quella "scuola intuizionista" che ricercò una matematica fondata su entità matematiche costruibili esplicitamente (con la conseguente esclusione, fra l'altro, dei transfiniti). «Il programma [intuizionista] di Brouwer» - commentò Hilbert - «non è la rivoluzione, ma [...] un colpo di stato» [13]. La scuola di pensiero che si formò attorno a Hilbert - a cui si diede poi il nome di «formalismo» - aveva un forte sapore assiomatico con associate rigide regole di manipolazione degli enti scelti come fondamentali. Enti che - sosteneva Hilbert - andavano desautorati da ogni significato ontologico (anziché punti, rette e piani, dunque, potevano parimenti essere «tavoli, sedie, boccali di birra» [13]). Questo modo di procedere avrebbe permesso di mostrare, egli credeva, che i grandi edifici formali (fondamentalmente l'aritmetica di Peano e la teoria degli insiemi) fossero:

1. **consistenti** (ossia tali da non potervi dimostrare contemporaneamente P e $\neg P$)
2. **completi** (tali da potervi sempre dimostrare o P o $\neg P$)

¹ L'altra risoluzione, parallela, si ebbe con la teoria assiomatica di Zermelo-Fraenkel.

3. **decidibili** (tali cioè da contenere un procedimento (Verfahren) che in un numero *finito* di passi possa stabilire - anche senza fornirne dimostrazione - se $\forall P$ la proprietà P è dimostrabile oppure no)

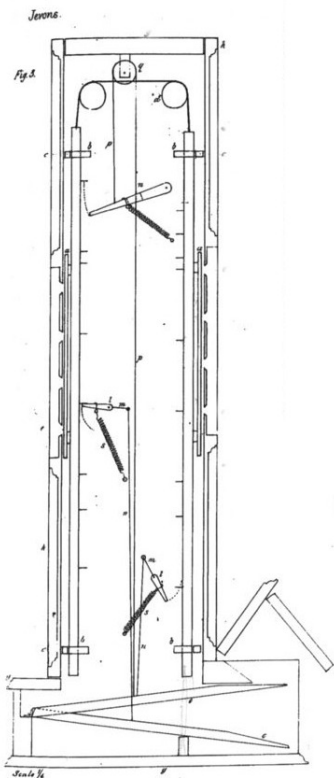


Figura 3: Il pianoforte logico di Stanley Jevons (1869): macchina completamente meccanica basata su una semantica booleana proposizionale. Poincaré commentò che nel formalismo «il geometra si potrebbe sostituire con il pianoforte logico di Stanley Jevons» o con «una macchina ideale nella quale si introducono da una parte gli assiomi e si raccolgono i teoremi dall'altra» come nella «leggendaria macchina di Chicago nella quale i maiali entrano vivi per uscirne [...] trasformati in prosciutti e salsicce» [13]. Disegno tratto dall'articolo originale di Jevons, "On the mechanical performance of logical inference"

Tali aspettative mostrano il lato - per certi versi - positivista di Hilbert e del suo programma. Malgrado le inevitabili critiche (fig. 3) Hilbert continuò a ribadire, in opposizione all'«*Ignoramus et ignorabimus*» del neurofisiologo Du Bois-Reymond, che «non esiste alcun ignorabimus [...] dobbiamo sapere e sapremo» [14].

Nel pieno della querelle si inserirono in sordina i lavori del ventiquattrenne Kurt Gödel, discussi a una tavola rotonda alla conferenza di Königsberg, nel 1930. Quando prese la parola presentando per la prima volta i suoi risultati pare che solo von Neumann ne comprese subito la portata e le implicazioni [13]. Che la fondazione formale della matematica si potesse ricondurre a quella della sola aritmetica era stato un notevole risultato di Frege; Gödel mostrò che ogni logica sufficientemente potente da poter generare l'aritmetica doveva essere o incompleta o inconsistente. È difficile quantificare la vastità dell'impatto culturale di questo risultato: basti dire che trabordò presto oltre i confini matematici. Nell'ambito delle neuroscienze Penrose lo usò per argomentare che il funzionamento del cervello non è intrinsecamente algoritmico, e già Stanisław Ulam (fig. 1) in "Reflections on the brain's attempts to understand itself" scriveva:

I do not believe that now, or even in the near or distant future, it will be possible to gain what might be called a complete understanding of the brain's operation. My belief rests on very important and strange results in pure mathematics [...] associated mainly with the name of Gödel [15].

Diverse voci (per fare solo alcuni nomi: Marvin Minsky, Stephen Hawking, Martin Davis, Scott Aaronson, Geoffrey LaForte) si sono schierate contro tali posizioni di Penrose, rigettandole quali forzature e argomentandone la fallacia: se ne discuterà nel terzo capitolo. Dopo il 1930 la logica matematica non fu più la stessa; Łukasiewicz e Tarski prima, Gödel successivamente definirono le rispettive, omonime, logiche polivalenti. Solo pochi anni dopo, nel 1936, von Neumann e Birkhoff diedero alle stampe *The Logic of Quantum Mechanics*, il manifesto della logica quantistica. I teoremi di Gödel scossero profondamente la matematica dei tempi: con essi venivano meno i primi due punti del programma di Hilbert. Il terzo, quello inerente alla decidibilità, crollò con Alan Turing.

Nella primavera del 1935 un ventitreenne Alan Turing seguì un ciclo di lezioni sui fondamenti della matematica presso il Saint John's College di Cambridge². Il corso era tenuto da Max Newman, uno dei pionieri della topologia, e due argomenti del syllabus spiccano fra gli altri e sarebbero stati per Turing rispettivamente martello e chiodo: i teoremi di Gödel e il problema della decisione ("*entscheidungsproblem*") di Hilbert. Quest'ultimo era un problema intimamente legato a quello della succitata decidibilità - ultima speranza formalista - e risultava ancora insoluto. Nei *Grundzüge der theoretischen logik* (1928) Hilbert e Ackerman scrivono:

Il problema della decisione è risolto se si conosce un procedimento che permetta, mediante un numero finito di operazioni, di decidere circa la validità o la soddisfacibilità di una espressione logica. [...] Il problema della decisione deve essere considerato il problema principale della logica matematica [14].

Nell'approcciare il problema della decisione Turing seguì una procedura algoritmicamente rigorosa tramite un *gedankenexperiment* dal sapore ingegneristico (del resto già a soli undici anni aveva progettato la costruzione di una macchina da scrivere). Immaginò dunque una macchina ideale - a cui poi Church diede il nome di macchina di Turing [14] - che potesse leggere da un nastro infinito alcuni simboli (in numero finito) divisi per cellette, spostandosi fra essi ed eventualmente scrivendo sul nastro a seconda delle istruzioni date alla macchina (il "programma"). Per assicurare un corretto funzionamento algoritmico impose che la macchina si potesse di volta in volta trovare solo in uno fra diversi possibili "*stati*" interni finiti, spostandosi, cancellando o scrivendo sul nastro a seconda del simbolo rappresentato in celletta in quel momento. Turing suppose che una tale macchina, anche se a prima vista rudimentale, fosse in grado di risolvere qualunque programma che in linea di principio risultasse calcolabile da un operatore umano (nell'Inghilterra di quegli anni il termine "computer" indicava in effetti la figura - umana - del contabile [14]). Alla stessa tesi, "per altra via, per altri porti", era giunto indipendentemente Alonzo Church e si è dunque soliti indicarla come tesi di Church-Turing. Una volta descritta la sua macchina ideale e utilizzando poi una tecnica di diagonalizzazione dei reali calcolabili, Turing ricostruì l'antinomia di Richard da cui ricavò l'indecidibilità in scrittura della sua macchina. Ne concluse:

[...] it is shown that the Hilbertian Entscheidungsproblem can have no solution
[...] I propose therefore to show that there can be no general process for determining whether a given formula U of the functional calculus K is provable, i.e. that there can be no machine which, supplied with any one U of these formulae, will eventually say whether U is provable [16].

Le macchine fin qui descritte catturano l'essenza dei processi algoritmici, tuttavia sono limitate dallo specifico programma per cui sono state progettate. Turing introdusse allora l'astrazione di Macchina di Turing Universale (MTU), una macchina che cioè riceve in input - oltre al succitato nastro - anche la descrizione di una qualunque (specifica) macchina di Turing (MT). La MTU che simula così sul nastro ogni possibile MT segna l'inizio della computazione moderna i cui ultimi artefatti sono i nostri computer.

² A Cambridge Turing si interessò con curiosità caleidoscopica a vari argomenti: dalle lezioni di Arthur Eddington ai lavori di logica quantistica di von Neumann [13].

Le influenze del lavoro di Turing si cominciarono ad osservare attorno agli anni '50 con la nascita dei primi calcolatori. Ulam ricorda, in una lettera: «nel 1939 von Neumann mi fece diverse volte il nome di Turing a proposito di metodi meccanici per lo sviluppo di sistemi matematici formali», e ancora: «Si doveva scrivere [...] con un certo metodo che in realtà aveva a che fare con gli schemi di Turing» [13]. I primi computer avevano bisogno di continua manutenzione ed erano rumorosi e ingombranti: Zuse tra il serio e il faceto osservava come la vibrazione dello Z4 fosse l'unica nota di colore nella monotonia delle notti di Zurigo [17]. Tuttavia dall'EDVAC fino ai nostri giorni l'architettura di un computer è sostanzialmente rimasta quella di von Neumann (processore, memoria, input/output, bus di dati). I circuiti di base che costituiscono le componenti elementari di tale architettura (la ALU nella CPU, ad esempio) si possono ottenere utilizzando opportune porte logiche, le quali sono riconducibili al NAND (o dualmente al NOR) grazie a un risultato dimostrato da Sheffer già nel 1913. Dopo la guerra Turing cominciò ad interessarsi all'intelligenza artificiale. Un esempio notevole lo si trova in un articolo che precorre le reti neurali, rimasto inedito per quattordici anni dopo la sua morte [18], in cui ipotizzava che una rete di neuroni artificiali interconnessi casualmente ("macchine disorganizzate") potesse ordinarsi sfruttando nuovi mapping neurali tramite NAND. Ne conclude:

«La corteccia di un bambino in età infantile è una macchina disorganizzata che può essere organizzata mediante un opportuno addestramento di interferenza» [18].

Una volta adulto il cervello diventa dunque una macchina organizzata, idea che era emersa già nella sua concettualizzazione delle macchine di Turing («A man provided with paper, pencil, and rubber and subject to strict discipline, is in effect a universal machine» [19]).

2.3 VERSO UNA COMPUTAZIONE QUANTISTICA

Negli anni '70 alcuni eventi prepararono la strada alla ridiscussione della tesi di Church-Turing che sarebbe avvenuta nel decennio successivo. La miniaturizzazione prevista dalla legge di Moore fu uno di quegli eventi: che i componenti dei computer non fossero più ingombranti valvole, ma circuiti integrati sempre più piccoli portava inevitabilmente a chiedersi cosa sarebbe successo una volta che si fossero raggiunte lunghezze critiche, ossia (*hic sunt leones*) lunghezze via via meno rappresentative del mondo descritto dalla fisica classica. Un altro contributo importante venne da Solovay e Strassen, i quali proposero un test probabilistico per la ricerca di numeri primi; un tale test sembrava portare la promessa di maggiore efficienza computazionale rispetto a quella dei deterministici computer "tradizionali". Era, questo, un primo notevole esempio di una modifica in chiave probabilistica della tesi di Church-Turing forte, e mostrò che erano possibili altre vie oltre a quelle fino ad allora battute. Gli anni '80, con i contributi di Feynman da una parte e di Deutsch dall'altra, colsero appieno quest'aria nuova. Scrive Feynman in *Simulating physics with computers* (1981): «We now go onto consider how such a computer can also be built using the laws of quantum mechanics. We are going to write a Hamiltonian, for a system of interacting parts, which will behave in the same way as a large system in serving as a universal computer» [20]. La necessità di risolvere sistemi quantomeccanici che non avevano soluzioni analitiche portò dunque Feynman a paragonare l'efficienza di simulazioni fatte su computer classici con quella ottenuta da ipotetici (ai tempi) computer quantistici. Il tempo di risposta nel calcolare l'evoluzione di un sistema di N atomi interagenti risultava esponenziale per i

primi, mentre polinomiale (con opportuni algoritmi) per i secondi; una breve contestualizzazione del come ciò accada viene discussa nel prossimo paragrafo. Quattro anni dopo, nel 1985, Deutsch propose una modifica strutturale alla tesi forte di Church-Turing, postulando una macchina di calcolo che simulasse, in stati finiti, ogni sistema fisico realizzabile con risorse finite. Una macchina che - come aveva mostrato Feynman - potesse costruire le sue simulazioni partendo, tramite approccio *bottom-up*, da leggi fondamentali della fisica quali quelle quantistiche, e che allo stesso tempo fosse più generale di specifiche istanze di macchine probabilistiche. Una macchina di Turing, insomma, che fosse quantistica e alla quale si diede il nome di computer quantistico universale.

2.4 QUBIT

Veniamo ora ad inquadrare, pur se in breve, le caratteristiche strutturali che differenziano un'architettura quantistica da una classica. L'informazione classica codifica in binario lo stato on-off tramite bit (fig. 4).

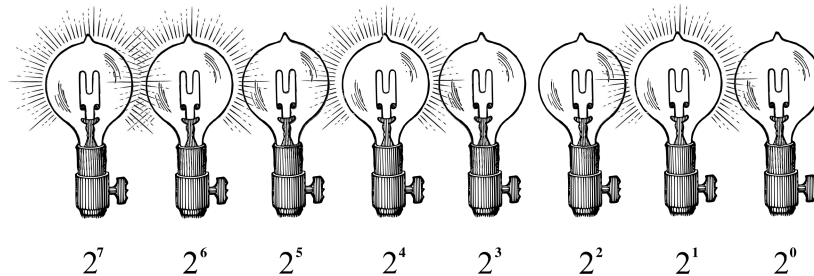


Figura 4: Codifica binaria in byte (8 bit) del numero decimale 210: le lampadine accese vengono rappresentate tramite 1, quelle spente tramite zeri: $(11010010)_2 = 2^7 + 2^6 + 2^4 + 2^1 = (210)_{10}$

Anche per l'equivalente quantistico del bit, il "qubit", esistono due stati misurabili che si indicano (con notazione ket di Dirac) come $|0\rangle$ e $|1\rangle$, tuttavia i qubit possono trovarsi, *prima della misura, ossia prima del collasso della funzione d'onda*, anche in uno stato di sovrapposizione quantistica:

$$|\psi\rangle = \alpha |0\rangle + \beta |1\rangle$$

α e β rappresentano le ampiezze degli stati, di modo che la probabilità di misurare una particella in $|0\rangle$ è $|\alpha|^2$ e analogamente la probabilità di misurarla in $|1\rangle$ è $|\beta|^2$. Le ampiezze di stati obbediscono dunque alla seguente regola di normalizzazione: $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$. Così ad esempio per una moneta truccata che avesse il doppio della probabilità di fare testa ($|1\rangle$) anziché croce ($|0\rangle$)

$$\begin{cases} P_{croce} = \frac{1}{3} = \alpha^2 \\ P_{testa} = \frac{2}{3} = \beta^2 \end{cases} \rightarrow \alpha = \sqrt{\frac{1}{3}}, \beta = \sqrt{\frac{2}{3}}$$

lo stato della moneta si scriverebbe come

$$|\text{moneta}\rangle = \sqrt{\frac{1}{3}} |0\rangle + \sqrt{\frac{2}{3}} |1\rangle$$

È possibile visualizzare i singoli qubit con l'ausilio grafico della sfera di Bloch, sulla cui superficie ogni punto corrisponde a un possibile stato di sovrapposizione di $|0\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ e $|1\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$. I poli corrispondono ai due stati misurabili $|0\rangle$ e $|1\rangle$, mentre all'equatore, ad

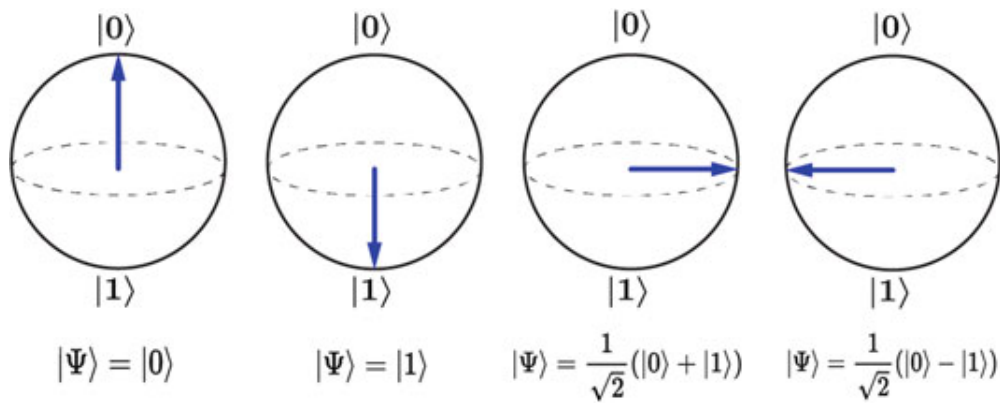


Figura 5: Sfera di Bloch, schema tratto da [21]

esempio, un qubit ha il 50% di possibilità di collassare su uno dei due stati al momento della misura (fig. 5).

Analogamente alle porte classiche, vengono definite per i qubit delle porte quantistiche (*quantum gates*³), le quali hanno associata una scrittura matriciale. Ad esempio alla porta NOT classica, che cambia il valore di un bit da 0 a 1 o viceversa, corrisponde la porta quantistica X di Pauli, la quale applicata a uno dei due poli della sfera di Bloch restituisce l'altro polo:

$$X|0\rangle = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = |1\rangle$$

Se l'azione di porte quantistiche agenti su singoli qubit ricorda abbastanza da vicino l'equivalente classico, *quantum gates* agenti su più qubit (ad esempio CNOT) presentano invece un comportamento più complesso per via degli effetti di *entanglement*, la "spooky action at a distance" di Einstein.

2.4.1 Parallelismo

Il vantaggio computazionale offerto dai qubit risiede nella sovrapposizione degli stati, la quale permette a un computer quantistico di calcolare simultaneamente un'operazione su tutti gli stati prima del collasso della funzione d'onda. Si è soliti riferirsi a questa proprietà di un calcolatore quantistico come "parallelismo". Ad esempio gli stati in parallelo di un computer quantistico a 3 qubit sono

$$|000\rangle, |001\rangle, |010\rangle, |100\rangle, |011\rangle, |110\rangle, |101\rangle, |111\rangle$$

da cui si vede come, in generale, un sistema a n-qubit riesca ad eseguire 2^n operazioni alla volta [21]. Il vantaggio computazionale si ha in realtà solo in alcuni casi molto specifici, ottenibili grazie a particolari algoritmi che sfruttano determinati effetti di sovrapposizione. Alcuni decisivi contributi nella ricerca di tali algoritmi sono stati apportati dallo stesso Deutsch (algoritmo quantistico di Deutsch-Jozsa), da Peter Shor (algoritmo di fattorizzazione) e da Lov Grover (algoritmo di ricerca).

³ La realizzazione tecnologica di tali porte quantistiche può avvenire ad esempio tramite campi magnetici e dipende fondamentalmente dall'implementazione specifica (tramite sistemi ottici, superconduttori, molecole) scelta per il computer quantistico in esame. Per le architetture a superconduttore è necessario tentare di ridurre il più possibile la decoerenza termica del sistema quantistico, portandolo a temperature prossime agli zero Kelvin.

Come si è dunque visto, uno dei frutti (a lungo termine) della crisi dei fondamenti è stata una necessaria precisazione sulla natura degli algoritmi. Da un punto di vista computazionale ha ora senso voler operare dei confronti fra questi ultimi a seconda del tempo che impiegano a terminare. Gli scacchi forniscono un ottimo esempio di complessità algoritmica⁴ perché hanno una serie di regole precise, un finale di partita inequivocabile, e soprattutto per via dell'esplosione combinatoria di possibilità che segue dopo ogni mossa. Alla base dell'interesse per tali algoritmi c'è l'*imitation game* di Turing, o se si preferisce il principio di identità degli indiscernibili di Leibniz: siamo naturalmente interessati a una macchina capace di svolgere attività complesse perché tendiamo a identificare queste ultime come un prodotto caratteristico del nostro pensiero. E nei primi anni 2000 l'appena ventenne *quantum computing* venne salutato con un certo ottimismo per via delle potenzialità di calcolo insite nel suo parallelismo. Scriveva Mario Rasetti su *Le Scienze*, all'inizio del nuovo millennio:

[la legge di Moore] è forse la ragione più banale per cui scienza dei calcolatori e meccanica quantistica paiono destinati a incontrarsi. Una motivazione più sottile, seppure al momento speculativa, deriva dalla congettura che il cervello sia un computer che segua leggi quantistiche. La plausibilità dell'ipotesi è suffragata da alcune osservazioni. Si pensi, per esempio, al sostanziale fallimento - non inficiato dai parziali successi di Deep Blue - dei software progettati per giocare a scacchi. Per confrontarsi con un campione del mondo la macchina utilizza circa 10^{10} byte di memoria e analizza circa un milione di posizioni al secondo. Poiché il tempo operativo di un neurone è dell'ordine del millesimo di secondo, non si spiega come, ricorrendo ad algoritmi classici, un cervello umano (sia pure quello di Kasparov) possa mostrare altrettanta efficienza. Ma anche compiti all'apparenza meno spettacolari, come la generazione e la comprensione di linguaggi, costituiscono una sfida forse insormontabile per computer che si limitino a usare algoritmi classici [4].

Tuttavia nel primo decennio del 2000 la letteratura ha ridimensionato le classi di complessità risolubili da un computer quantistico (linea frastagliata in fig. 6), che includerebbero i problemi P e alcuni NP (come la fattorizzazione) ma non le classi di complessità (almeno) NP completa (quali ad esempio la colorabilità di mappe, il problema del commesso viaggiatore, gli scacchi, il gioco del go). Come scrive Scott Aaronson su *Scientific American* (2008):

Allo stato attuale sappiamo che [i computer quantistici] sarebbero straordinariamente più veloci in alcuni problemi specifici, come la violazione dei protocolli crittografici [...] per altri, invece - come giocare a scacchi [...] le conoscenze di cui disponiamo suggeriscono che i computer quantistici soffrirebbero di numerosi limiti degli algoritmi tipici dei computer classici [...] indipendenti dalle difficoltà pratiche insite nella costruzione [...] come la decoerenza [22].

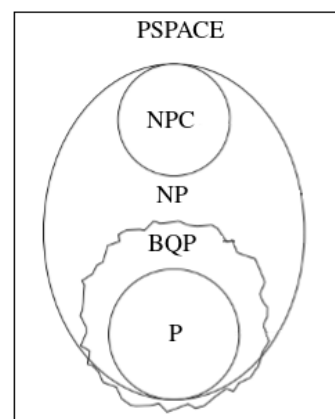


Figura 6: classi di complessità ed esempi rappresentativi: P = polinomiale (primalità di un numero), BQP = bound error quantum polynomial (fattorizzazione), NP = non polinomiale (isomorfismo di grafi), NPC = non polinomiale completo (commesso viaggiatore), PSPACE (scacchi $n \times n$)

⁴ Turing stesso aveva implementato su carta un primo programma di scacchi: Turochamp [14].

3 PROCESSI QUANTOMECCANICI NEL CERVELLO ANIMALE

Coerentemente con il profilo storico fin qui delineato e con l'evoluzione della biologia quantistica, diverse ricerche negli ultimi anni si sono prefisse di fornire una spiegazione quantomeccanica di fenomeni biologici legati al cervello e alla percezione dell'ambiente. I primi studi che verranno discussi in questo capitolo riguardano strettamente la trasduzione sensoriale di uno stimolo esterno. Si tratta di "problemi di interfaccia" che approfondiscono come i costituenti della materia inorganica - quali ad esempio fotoni e molecole aromatiche - vengono esperiti da un organismo vivente (§3.1, §3.2). Storicamente tali ricerche sono state ispirate da fenomeni caratteristici del mondo animale come quelli migratori. Un'altra parte di letteratura, poi, ha invece proposto modelli più o meno speculativi secondo cui proteine o altre molecole site nel cervello esibirebbero comportamenti quantomeccanici tali da renderle dei qubits biologici (§3.3, §3.4).

3.1 MIGRAZIONI E MAGNETORICEZIONE

Ogni anno, tra settembre e novembre, milioni di farfalle monarca intraprendono un viaggio di migliaia di chilometri dal Canada meridionale al Messico. Capire come riescano a trovare la strada di ritorno con estrema precisione su un tragitto così lungo è reso ancor più difficile dal fatto che si accoppiano durante il viaggio: così le farfalle che ripartono dalle montagne messicane sono le nipoti di quelle che avevano lasciato il Canada. Nell'esplorare i modi usati dalle monarca per orientarsi, gli scienziati si sono ricondotti a studiare una specie più semplice come il moscerino della frutta. La *Drosophila Melanogaster* ha infatti dei tempi riproduttivi molto rapidi ed è un candidato ideale per esperimenti selettivi che coinvolgano mutazioni genetiche. A tal proposito nel 1998 i genetisti osservarono che una drosophila il cui ritmo circadiano non era influenzato dall'esposizione alla luce, aveva subito una mutazione nel gene che codifica una proteina fotosensibile: il crittocromo. Tale proteina si arrotola su un pigmento chiamato «flavina adenina dinucleotide» (FAD), capace di assorbire la luce blu. In seguito si scoprì che le antenne delle farfalle monarca contenevano crittocromi, e a riprova di ciò gli esemplari a cui venivano opacizzate le antenne perdevano il loro orologio circadiano. Esperimenti condotti nel 2008 dal team di Steven Reppert hanno mostrato come drosophile mutanti, alle quali si rimpiazzava il gene che codifica il crittocromo con quello sano delle farfalle monarca, riuscivano a recuperare il ritmo circadiano [23]. Oltre all'evidente legame con la fotosensibilità, si scoprì che il crittocromo è anche legato al magnetismo: esperimenti mostrarono che le drosophile normalmente seguono il braccio magnetizzato di un labirinto (senza cibo), mentre i moscerini geneticamente privi di crittocromi non optano per vie preferenziali. Un articolo del 2014 di Guerra, Geger e Reppert mostra come le farfalle usino una tale magnetoricezione per migrare, grazie ai crittocromi presenti nelle loro antenne [23]. Lo studio dei fenomeni migratori delle monarca ha molti parallelismi con le ricerche condotte sulle migrazioni degli uccelli, in particolare dei pettirossi (*Erithacus rubecula*). Le prime osservazioni su una correlazione tra tali migrazioni e il campo magnetico terrestre si devono allo zoologo russo Aleksandr von Middendorf, il quale osservando la direzione di volo dei migratori dedusse attorno al 1850 che c'era una «generale convergenza verso nord» e che sembrava che « gli uccelli migratori si orientassero

per mezzo del campo magnetico terrestre» [23]. Esperimenti in questa direzione vennero poi condotti da un fisico americano, Henry Yeagley, che attaccando delle piccole calamite alle ali dei piccioni viaggiatori mostrò come ciò ne compromettesse l'orientamento. In tempi più recenti (1965) lo studioso tedesco Hans Fromme della scuola ornitologica di Fritz Merkel mostrò come alcuni uccelli fossero sensibili al campo magnetico generato da una bobina di Helmholtz. Dieci anni dopo, gli esperimenti condotti da Wolfgang e Roswitha Wiltschkos con un imbuto di Emlen (fig. 7) mostrarono che i pettirossi erano in grado di percepire il campo magnetico terrestre puntando verso il polo magnetico più vicino, a prescindere da quale fosse (modello della bussola a inclinazione) [23].

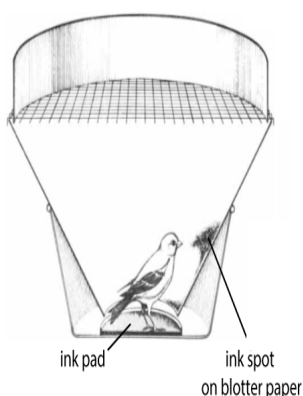


Figura 7: Un imbuto di Emlen: sul fondo è adagiato un tampone di inchiostro, le pareti sono invece ricoperte di carta assorbente per evidenziare la direzione delle impronte. Disegno tratto dall'articolo originale di Emlen del 1975 su Scientific American

Tuttavia rimaneva irrisolto un problema fondamentale, e cioè che il campo magnetico terrestre è estremamente debole (varia tra circa 0.25 e 0.65 gauss) perché possa influenzare la chimica biologica in un modo evidente. Dunque o nel corpo di tali animali esistono strutture ferrose tali da permettere l'orientamento (come fa una classica bussola magnetica) oppure la magnetoricezione dipende da una bussola chimica. I tentativi nella prima direzione si sono alla lunga rivelati infruttuosi: è vero che si sono rinvenuti cristalli di magnetite in vari batteri come anche nel becco di piccioni viaggiatori, tuttavia la magnetite è praticamente assente in migratori come i pettirossi; in secondo luogo l'imaging a risonanza magnetica ha mostrato nel 2012 che le cellule contenenti magnetite nei becchi di alcuni uccelli avevano funzione di macrofagi, e non di orientamento spaziale [23]. Un dettaglio non banale che era emerso dagli studi sui pettirossi è che la loro capacità di orientamento veniva meno se li si bendava, a suggerire che nella magnetoricezione la luce giocasse un ruolo importante. Nello stesso anno in cui i Wiltschkos pubblicavano il loro lavoro (era il 1976) il chimico tedesco Klaus Schulten dell'istituto Max Planck di Gottinga per la chimica biofisica propose un meccanismo chimico che legasse luce e magnetoricezione e due anni dopo, nel 1978, lo usò per descrivere il funzionamento della bussola biologica dei pettirossi. Per meglio comprendere il comportamento quantistico di questo meccanismo è utile premettere alcune considerazioni. Per il principio di esclusione di Pauli nessuna coppia di elettroni in un atomo può essere descritta dagli stessi quattro numeri quantici, per cui due elettroni isoenergetici hanno spin antiparallelo. Giacché gli elettroni possono coesistere in un singolo stato si dice che si trovano in uno stato di singoletto; se però essi non sono isoenergetici possono avere spin parallelo e a ciò ci si riferisce come stato di tripletto (tale dicitura sottolinea il numero di direzioni assumibili dallo spin totale). La rilevanza biologica si evidenzia in molecole i cui atomi condividono in legame covalente una coppia di elettroni, i quali rimangono entangled (e per lo più in stato di singoletto) anche dopo la rottura del legame. Dopo che i due atomi (che prendono ora il nome di radicali liberi) si separano, uno degli elettroni può cambiare verso di spin, e si ottiene così uno stato di sovrapposizione quantistica tra singoletto e tripletto. Il punto fondamentale è che la probabilità di trovare due elettroni in stato di singoletto o di tripletto è asimmetrica e può essere influenzata da deboli campi magnetici. Partendo da questa osservazione e dal fatto che il crittocromo è una proteina fotosensibile che esposta alla luce forma radicali liberi, Schulten e il suo

gruppo di ricerca proposero nel 2000 il seguente modello:

- il pigmento flavina adenina dinucleotide (FAD) avvolto dal crittocromo assorbe un fotone
- questo fotone espelle un elettrone da un atomo della FAD, creando così una lacuna
- un amminoacido – il triptofano – si comporta da donatore, cedendo un elettrone alla lacuna
- l'elettrone all'interno del crittocromo e l'elettrone dell'amminoacido rimangono entangled in uno stato di sovrapposizione di singoletto e tripletto
- l'equilibrio tra gli stati di singoletto e tripletto è estremamente sensibile alla direzione e all'intensità del campo geomagnetico, indicando al pettirosso il polo magnetico più vicino

Dai primi anni del nuovo millennio diverse ricerche hanno fornito supporto sperimentale a favore di questo modello. Di notevole interesse a tal proposito sono i risultati del 2007 di Henrik Mouritzen (isolamento di molecole di crittocromo nella retina del beccafico) e i lavori congiunti di Thorsten Ritz con Wolfgang e Roswitha Wiltschkos sulla magnetoricezione ad alte frequenze. Il meccanismo di orientamento tramite crittocromi, in conclusione, sembra essere comune ad animali più o meno distanti tra loro: diversi uccelli, insetti, alcuni pesci. Un loro antenato comune andrebbe rintracciato milioni di anni fa; come notano Al-Khalili e McFadden in *La fisica della vita*, dunque: «Sembra che le «azioni misteriose a distanza» di Einstein abbiano aiutato le creature terrestri a trovare la strada per quasi tutta la storia del nostro pianeta» [23].

3.2 IL SENSO DELL'OLFATTO NELLA DROSOPHILA

Un recente filone di ricerca quantobiologica che ha destato un certo interesse si propone di inquadrare olfatto e neurotrasmettitori (classicamente spiegati dal meccanismo "chiave-serratura) tramite modelli vibrazionali quantomeccanici. Modelli olfattivi diversi dal *lock and key* erano già stati suggeriti all'inizio del secolo scorso. Negli anni venti il chimico Malcolm Dyson aveva proposto una teoria vibrazionale dell'olfatto, osservando una mancata correlazione tra la forma di una molecola e il suo odore: ad esempio esistevano molecole dalle forme molto diverse con lo stesso odore, e viceversa (fig. 8). Ispirato dai lavori di spettroscopia che sarebbero poi valse il nobel a Raman nel 1930 suggerì che il naso potesse distinguere le vibrazioni dei legami molecolari, operando come una sorta di spettroscopio biologico [23]. Tale proposta non ebbe seguito perché risultava troppo speculativa e mancava di una adeguata spiegazione meccanica. Inoltre per risolvere un problema ne creava uno nuovo: le molecole chirali, infatti, hanno uno stesso spettro di Raman ma esibiscono spesso odori diversi (ad esempio il limonene si può presentare in due forme enantiomeriche: una dal tipico odore di arancia, l'altra - il dipentene - dall'odore di trementina). In tempi più recenti Luca Turin ha ripreso nel 1996 la teoria di Dyson, proponendo il verificarsi di effetto tunnel anelastico al livello dei recettori olfattivi [23].

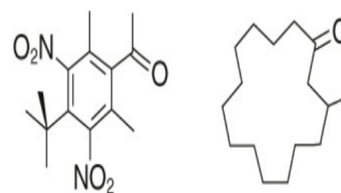


Figura 8: Due molecole dalla forma molto diversa ma dallo stesso odore (muschio). Dyson propose che fossero specifici legami molecolari (in questo caso i doppi legami C=O) a conferire l'odore ai composti. Disegno tratto da [23]

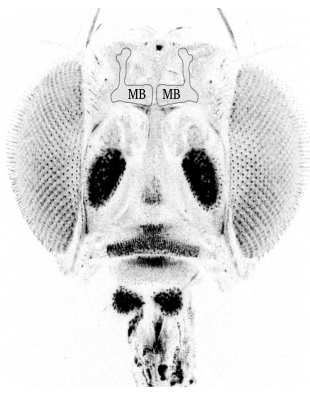


Figura 9: Vista frontale di una drosofila. Con MB sono indicati i corpi fungiformi (*mushroom bodies*) del sistema olfattivo dell'insetto. Foto tratta dal Berry Lab dell'Università di Alberta

presentate nel primo capitolo [2]. Lo strato nascosto della rete neurale corrisponde ai corpi fungiformi caratteristici di ogni insetto, organizzati inizialmente in maniera casuale, ma ordinabili tramite apprendimento (fig. 9). La teoria vibrazionale è poi stata recentemente discussa nel contesto di neurotrasmettitori quali adenosina e serotonina; Hoehn, ad esempio, ha proposto un modello di neurotrasmissione della serotonina basato su effetto tunnel anelastico, analogamente ai modelli olfattivi descritti da Turin [24].

Quindici anni dopo Franco et al. hanno addotto evidenze sperimentali a supporto di questa tesi, mostrando come le drosofile sembrerebbero capaci di distinguere tra composti aromatici che, avendo il deuterio in sostituzione dell'idrogeno, presentano modi vibrazionali differenti [24]. Il gruppo di ricerca di Efthimios Skoulakis, dell'istituto Alexander Fleming di Atene, ha esteso tali esperimenti a drosofile anosmiche in labirinti magnetizzati («[...] Come previsto, questi mutanti anosmici erano completamente incapaci di distinguere tra le molecole a idrogeno e quelle a deuterio» [23]). Anche se tali modelli vibrazionali dell'olfatto non trovano sufficiente riscontro sperimentale nei mammiferi, diverso potrebbe essere il caso per gli insetti (drosofile, scarabei americani) ed alcuni pesci, i quali sembrano riuscire a distinguere tra diversi isotopi di amminoacidi o feromoni. Va pur notato in tal senso che i recettori olfattivi degli insetti differiscono da quelli dei mammiferi, rendendo difficile fare delle generalizzazioni tassonomiche inter-classe [24]. Nel 2013 Sophie Caron e Vanessa Ruta hanno mostrato che il sistema olfattivo della drosofila presenta una analogia formale con le reti neurali a tre layer

3.3 ORCH-OR

Riprendendo una riflessione già aperta da John Lucas negli anni sessanta, il matematico e premio Nobel per la fisica Roger Penrose ha proposto che il cervello non abbia un funzionamento algoritmico e che risulti più potente di qualunque sistema formale in conseguenza dei teoremi di Gödel, presentati in §2.1. Questa tesi è discussa nel suo libro *The Emperor's New Mind* del 1989, in cui Penrose sostiene che il cervello umano sia in grado di trovare enunciati G di cui conosce la veridicità, ma la quale - per via delle limitazioni gödeliane - non risulta conoscibile nel sistema formale F che contiene G . Propone allora la necessità di un "clinamen" intuitivo: «Il problema se una macchina di Turing si fermerà o no non è una cosa che si possa decidere algoritmicamente. Per decidere se un algoritmo funzionerà o no c'è bisogno di una comprensione intuitiva e non solo di un altro algoritmo» [25]. Malgrado questa lettura personale dei teoremi di Gödel sia stata da molti criticata come fallace¹, nei primi anni novanta Penrose diede inizio

¹ Come scrive Martin Davis, ne *Il calcolatore universale*: «Secondo Penrose, nessuno specifico algoritmo che venga proposto come equivalente al funzionamento della mente sarà mai adeguato allo scopo perché con un atto di "intuito" possiamo vedere che la proposizione di Gödel per quell'algoritmo è vera. Questo argomento è profondamente sbagliato per una ragione che Turing aveva illustrato, quarant'anni prima, nella sua conferenza del 1947 alla London Mathematical Society. Turing aveva sottolineato che il teorema di Gödel è applicabile solo ad algoritmi che generano esclusivamente proposizioni vere, mentre nessun matematico umano può rivendicare l'infallibilità. [...] Perciò nel teorema di Gödel non c'è niente che impedisca alle capacità matematiche della mente umana di essere equivalenti a un processo algoritmico che produca enunciati sia falsi sia veri» [13].

ad una collaborazione con il medico anestesista Stuart Hameroff per individuare processi quantomeccanici all'interno dei microtubuli neuronali². Ne nacque una teoria complessa e criticata, l'Orch-OR (*Orcherstrated Objective Reduction*), che lega il collasso quantistico della funzione d'onda a effetti gravitazionali relativistici. Tale teoria venne presentata al pubblico nel libro del 1994 *Shadows of the mind*.

3.4 MOLECOLE DI POSNER

Ricerche su un possibile processo di entanglement neurale, infine, sono state condotte studiando lo spin nucleare dell'atomo di fosforo. Nel 1998 Kane propose un modello di computer quantistico basato su nuclei di fosforo in un substrato di silicio, che grazie alle peculiari proprietà del fosforo permettesse di dilatare i tempi dell'inevitabile decoerenza [24]. In tempi più recenti, Matthew Fisher ha pubblicato sugli *Annals of Physics* (2015) una teoria secondo cui lo spin nucleare dell'atomo di fosforo possa comportarsi come un qubit biologico all'interno del cervello. Tra le possibili molecole di rilevanza biologica che ospitano il fosforo, Fisher identifica come ideali candidate le molecole di Posner. Queste ultime possono essere pensate come dei reticoli di Bravais cubici (lievemente distorti) a corpo e facce centrate, con uno ione calcio in ogni vertice e al centro del cubo, e uno ione fosfato al centro di ogni faccia. Secondo il modello proposto, illustrato in fig. 10, in due molecole di Posner si crea entanglement di altrettanti gruppi fosfato, i quali anche se successivamente distanziati (nelle rispettive molecole) coordinano il rilascio di neurotrasmettitori in modo sincrono, creando un firing neurale parallelo [24]. Fisher ha stimato che il suo modello presenti decoerenza non prima di ore, o (in un successivo articolo) giorni. Player et al. hanno però successivamente ricontestualizzato tali stime tenendo in considerazione altri fattori, e riducendo il tempo di decoerenza a 37 minuti [24]. La teoria di Fisher è al vaglio di verifiche sperimentali, tra cui alcuni studi sul litio (usato per curare sindromi depressive e bipolari) che sembrerebbe avere un effetto isotopo-dipendente sul comportamento dei topi. Tale meccanismo è interpretabile secondo Fisher facendo riferimento a molecole di Posner con ioni litio in sostituzione degli ioni calcio centrali [24]. Di recente Halpern e Crosson, del Caltech di Pasadena, hanno traslato gli aspetti chimico-fisici descritti da Fisher nell'ambito della teoria dell'informazione quantistica, pubblicando i loro risultati nel 2018 sugli *Annals of Physics* [26].

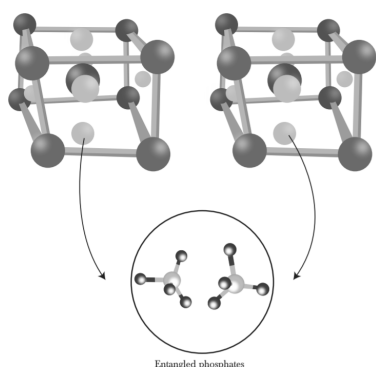


Figura 10: Meccanismo di entanglement degli ioni fosfato all'interno delle molecole di Posner. Schema tratto da [24]

² I microtubuli neuronali sono polimeri della tubulina presenti in tutte le cellule eucariote e - nella fattispecie - nei dendriti e nel soma delle cellule nervose [24].

4 CONCLUSIONI

Il primo capitolo ha esplorato quanto sia stato pervasivo il ruolo dell'analogia nello sviluppo storico della neurofisiologia; si è poi illustrato come il sogno della cibernetica di Wiener di mostrare l'esistenza di un binomio cervello-computer si sia infranto su diversi scogli. Questi – chiosava von Neumann – si possono ridurre a due: un problema di architetture (il calcolatore computa serialmente, il cervello in parallelo) e un problema di fluttuazioni statistiche (il firing neuronale nel cervello è probabilistico). Dagli anni '80 in poi una certa letteratura ha intravisto nel parallelismo dei computer quantistici - descritti nel secondo capitolo - una possibile soluzione a tali problemi. Se ne trova traccia in teorie come la Orch-OR di Penrose o in argomentazioni che chiamano in causa problemi di complessità computazionale: la computazione quantistica spiegherebbe come il cervello riesca rapidamente a risolvere problemi complessi, che appaiono difficilmente risolvibili con architetture classiche. Entrambi gli approcci, per quanto suggestivi, presentano tuttavia dei problemi – logici o sperimentali – che verranno ora discussi. Per quanto riguarda la teoria di Penrose si è già mostrato in §3.3 come una interpretazione fin troppo elastica e personale dei teoremi di Gödel abbia portato a fondare la susseguente teoria su fondamenta (almeno meta-matematiche) precarie. Ci sono poi delle difficoltà nel postulare comportamenti quantomeccanici per proteine della grandezza della tubulina, sia per motivi di scala che di entanglement. Il fisico Max Tegmark ha dimostrato nel 2000 che pur accettando le premesse di Penrose si avrebbe decoerenza nei microtubuli dopo solo pochi picosecondi, un tempo troppo breve per consentire ipotetiche computazioni di qualche rilevanza [23]. Diverso, per quanto comunque ancora del tutto speculativo, sembra essere il discorso per ciò che riguarda le molecole di Posner, le quali - almeno sulla carta - avrebbero dei tempi di decoerenza molto più rilassati e una scala di azione più plausibile. La seconda argomentazione, esemplificata dall'articolo di Rasetti citato in §2.5, mette a confronto le prestazioni del cervello e di un computer classico nella risoluzione di problemi – come ad esempio gli scacchi o il Go – che risultano computazionalmente complessi. L'architettura parallela permetterebbe, secondo tale ragionamento, di abbattere drasticamente i tempi di risposta che con architetture classiche aumenterebbero esponenzialmente al ramificarsi dell'albero delle possibilità. Anche qua sono d'obbligo due considerazioni. La prima: i programmi ad architetture classiche sono incredibilmente migliorati negli ultimi anni grazie al deep learning. Nel primo capitolo si è descritto brevemente come funziona una rete neurale a 3 layer (fig. 2d); nel deep learning – in italiano: “apprendimento profondo” – lo strato nascosto o hidden layer è ripetuto diverse volte. Tra le recenti conquiste del deep learning ormai penetrate nella percezione comune si annoverano i deepfake, le macchine a guida automatica, i programmi di riconoscimento facciale. Ma per seguire più da vicino quanto discusso in §2.5 si potrebbero citare i progressi di GPT-3 nella produzione automatica di testi, oppure AlphaGo, il motore di gioco del Go basato su reti neurali profonde che dal 2015 ha iniziato a vincere campioni umani consistentemente e senza handicap. È un esempio notevole sia perché l'architettura soggiacente il software è completamente classica sia perché il gioco del Go è computazionalmente più complesso degli scacchi. Il secondo caveat è stato anticipato in §2.5: esistono comunque dei limiti alle applicazioni della computazione quantistica, il cui parallelismo dà un vantaggio computazionale per simulazioni quantistiche di cluster atomici o problemi di crittografia, ma non per problemi

NP completi¹. D'altro canto i problemi NP completi figurano in ciò che riguarda i neuroni in almeno due circostanze importanti:

- **il folding proteico che si ha nelle sinapsi**

Si è scoperto che alcune proteine, cambiando la loro struttura conformazionale, giocano un ruolo chiave nella trasmissione del segnale nervoso. Un ripiegamento sbagliato è stato osservato in concomitanza di malattie neurodegenerative come l'Alzheimer o il Parkinson [27]. Le modalità con cui avviene il folding proteico sono tuttavia estremamente complesse da un punto di vista computazionale².

- **la morfogenesi del connettoma fetale**

Le modalità di interconnessione neuronale ricordano da vicino il classico problema del commesso viaggiatore. Come scrive John Pavlus in Scientific American:

Mentre un feto umano è in gestazione nell'utero il suo cervello completa i collegamenti necessari alla sopravvivenza partendo da miliardi di singoli neuroni. Aver trovato la migliore rete di collegamenti possibile fra tutte queste cellule è un problema NP-completo che l'evoluzione sembra aver risolto [28].

È dunque legittimo chiedersi come faccia il cervello a risolvere problemi di tale complessità. La risposta che sembra affermarsi in questi ultimi anni è ben lontana dall'astratta formalizzazione matematica tipica di un calcolatore (specie quantistico): il cervello è organico, come notava von Neumann, e forgiato dall'evoluzione; quello che fa è trovare delle soluzioni approssimate a problemi NP, con un margine di errore sufficientemente piccolo da dare l'illusione di risolverli. Mark Changizi, neurobiologo evolutivo, scrive:

Quando un neurone si allunga da un punto per collegarsi a un insieme di altri punti sinaptici, risolve sostanzialmente un problema di ottimizzazione di un grafo, che è NP difficile.[...] L'evoluzione è limitata da P contro NP [...] però funziona ugualmente, perché non sempre la vita richiede la perfezione per funzionare bene [28].

Gli studi in questo senso sono stati condotti facendo ricerche su animali dal connettoma particolarmente semplice quali ad esempio i vermi nematodi. Scrive Pavlus:

[...] il cervello in realtà non risolve il problema, trova un'approssimazione molto vicina alla soluzione. (In pratica la disposizione dei neuroni ricade entro il 3% di quella ottimale.) Il verme *Caenorhabditis elegans* ha solo 302 neuroni, tuttavia non ha un diagramma di connessioni neurali perfettamente ottimizzato, nonostante miliardi di miliardi di generazioni siano state spinte dalla selezione naturale ad agire sul problema [28].

Non sembra allora che l'ipotesi di una architettura quantistica sia effettivamente necessaria per spiegare i problemi computazionali, pur complessi, che il nostro cervello affronta quotidianamente. Ciò non toglie, tuttavia, che diversi fenomeni biofisici all'interfaccia sensoriale

¹ A tal proposito Rasetti nota, a distanza di dieci anni dall'articolo de Le Scienze citato in §2.5, che «Il ricorso a metodi topologici e, in particolare, alla teoria topologica quantistica dei campi, anziché alla ordinaria meccanica quantistica, recentemente, ha aperto la strada a nuove forme di algoritmi quantistici, che fanno sperare di poter affrontare in modo efficiente (in tempo polinomiale) problemi ardui» [29].

² Allo studio delle modalità del folding proteico sono attualmente indirizzate anche le ricerche di *AlphaFold*, programma di intelligenza artificiale basato sul deep learning.

tra corpi organici e materia inorganica possano essere interpretabili tramite modelli quantomeccanici, come si è discusso nel terzo capitolo a proposito di magnetoricezione, olfatto e neurotrasmettitori. Molta ricerca sperimentale è ancora necessaria e viene dunque condotta in tal senso. Se la storia della neurofisiologia discussa nel primo capitolo sembra poter insegnare qualcosa, è che le analogie mente-macchina hanno sempre fallito quando sono state trattate non più come analogie, ma come identità. In fin dei conti, è stata forse anche questa realizzazione ad aver affievolito e poi spento il fuoco della cibernetica negli anni cinquanta: gli ultimi scritti di von Neumann si preoccupano di evidenziare le differenze tra computer e cervello, mostrando perché l'uno non può essere l'altro. Ricordare che ogni secolo ha le sue analogie descrittive e che anche quelle attuali non saranno probabilmente le ultime, non è però limitante: la "fertilizzazione incrociata delle scienze" invocata da Maxwell, infatti, continua a fornire nuovi spunti di grande attualità. Nell'ambito della computazione quantistica sembra ben promettere il nascente *quantum machine learning*; nelle parole di Nicolò Parmiggiani (INAF):

Negli ultimi anni molte ricerche sono state portate avanti per unire i vantaggi dei computer quantistici con le reti neurali. Le reti neurali quantistiche sono modelli di reti neurali che si basano sulla meccanica quantistica per sviluppare algoritmi più efficienti sfruttando le proprietà dell'informazione quantistica. [...] Lo scopo principale [...] è quello di poter analizzare sistemi quantistici molto complessi che non sarebbero trattabili con il machine learning classico [30].

Ad esempio un particolare modello di rete neurale quantistica che è stato usato per l'object detection in astrofisica «si basa sull'architettura delle Convolutional Neural Network (Cnn) utilizzate nel machine learning classico [...] in cui i neuroni (artificiali) sono connessi tra loro con uno schema ispirato alla struttura della corteccia visiva animale» [30].

Un secondo ambito di ricerca, questa volta strettamente biomedico, riguarda invece la realizzazione di interfacce cervello-macchina tramite i *quantum dots*, semiconduttori attualmente di grande interesse nelle nanotecnologie. Nel 2014 sono stati usati per modellizzare l'eziologia di disturbi neuromuscolari come la miastenia grave [24]. Quattro anni dopo *quantum dots* di grafene sono stati impiegati per prevenire una agglomerazione proteica neuronale che porta al morbo di Parkinson, e nel 2017 un altro studio ha mostrato simili risultati per il morbo di Alzheimer [24].

Quale che sia l'effettiva estensione di fenomeni quantomeccanici presenti nel cervello animale, allora, l'ingegneria biomedica potrà forse avvalersi un giorno di tali ricerche nel campo della neuroprotesica per contrastare l'insorgenza di malattie neurodegenerative.

RINGRAZIAMENTI

Vorrei ringraziare alcune persone che, in vari modi, hanno reso possibile la stesura di questa tesi. Il mio relatore, il cui dinamismo e passione per la storia della scienza sono contagiosi e fonte per me di continua ispirazione; i miei genitori per il loro incondizionato sostegno: se si vede un po' più lontano salendo sulle spalle dei giganti, quelle spalle per me sono state le vostre; Irina, che con molta pazienza ha sopportato fin dal principio i miei flussi di coscienza joyciani sul cervello e mi ha sostenuto durante tutto il percorso; la grande famiglia (anche allargata!) della Miron Costin, origine di amicizie molto care, chiara dimostrazione che materie scientifiche, letterarie ed artistiche possono dialogare in armonia; Ester, con cui - tra stanchezza e risate - ho scritto, cancellato e riscritto lavagne su lavagne di biochimica; e ultimo solo in questa lista ma primo nei miei pensieri, mio fratello Carlo: le notti insonni trascorse a parlare di Hume e Kolmogorov mi hanno portato fin qui, e anche se su epistemologia e intelligenza artificiale non la vediamo sempre allo stesso modo potremo per lo meno continuare a battibeccare ancora per un po' senza correre il rischio di annoiarci.

A tutti voi un grazie dal più profondo del cuore.

Valerio Nucera

BIBLIOGRAFIA

- [1] W. Moore, *A life of Erwin Schrödinger*. Cambridge University Press, 1994, p. 278
- [2] M. Cobb, *Mente e cervello, una storia filosofica e scientifica*. Einaudi, 2021
- [3] F.H.Crick, *Riflessioni sul cervello*. *Le Scienze*, n. 135, 1979
- [4] G.Peruzzi (a cura di), *Il futuro del computer*. Quaderni di *Le Scienze*, n.121, 2001
- [5] F. Arute et al., *Quantum supremacy using a programmable superconducting processor* *Nature*, vol. 574, n. 7779, pp. 505-510, 2019
- [6] J. Gleick, *Genius, The Life and Science of Richard Feynman*. Open Road Media, 2011
- [7] G. Peruzzi, *Vortici e colori*. *Dedalo*, 2010, pp. 13, 178
- [8] P. Rossi (a cura di), *Storia della scienza*. Gruppo editoriale L'Espresso, vol. 8, p.204
- [9] J.v. Neumann, *The computer and the brain*. Yale University, 1958, p.82
- [10] A. Konopka, *System biology*. CRC Press, 2007, pp. 200, 201
- [11] J.v. Neumann, *Theory of self-reproducing automata*. Edited and completed by Arthur W. Burks. Illinois University Press, 1966, pp.24, 62
- [12] W. Carnielli and M. Coniglio, *Paraconsistent Logic*. Springer International Publishing, 2016, p. 365
- [13] M. Davis, *Il calcolatore universale*. Adelphi, 2012
- [14] G. Chinnici, *Turing: l'enigma di un genio*. Hoepli, 2016
- [15] S.M.Ulam, *Reflections on the brain's attempts to understand itself*. *Los Alamos Science*, n.15, 1987
- [16] A. Turing, *On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem*. *Proceedings of the London Mathematical Society*, vol. 2-42, no. 1, pp. 230-265, 1937
- [17] K. Zuse, *The computer, my life*. Springer-Verlag, 1993
- [18] B.J.Copeland e D.Proudfoot, *Alan Turing e le reti neurali*. *Le Scienze*, n. 370, 1999
- [19] B.J.Copeland, *Essential Turing: Seminal Writings in Computing, Logic, Philosophy, Artificial Intelligence, and Artificial Life, Plus the Secrets of Enigma*. Oxford University Press, 2004, p. 416
- [20] R.P. Feynman, *Simulating physics with computers*. *International Journal of Theoretical Physics*, vol. 21, no. 6-7, pp. 467-488, 1982
- [21] C. Hughes et al., *Quantum computing for the quantum curious*. Springer Nature, 2021
- [22] S.Aaronson, *I limiti del computer quantistico*. *Le Scienze*, n.477, 2008
- [23] J. Al-Khalili and J. McFadden, *La fisica della vita*. Bollati Boringhieri, 2015
- [24] B. Adams and F. Petruccione, *Quantum effects in the brain: A review*. *AVS Quantum Science*, vol. 2, no. 2, 2020
- [25] R. Penrose, *La mente nuova dell'imperatore*. Sansoni, 1998, p. 524
- [26] N. Yunger Halpern e E. Crosson, *Quantum information in the Posner model of quantum cognition*. 2021. *Annals of Physics* vol. 407, pp. 92-147, 2019
- [27] A. Wyttenbach and V. O'Connor, *Folding for the synapse*. Springer, 2011
- [28] J.Pavlus, *Macchine dell'infinito*. *Le Scienze*, n. 531, 2012
- [29] M.Rasetti, *Informazione e computazione quantistica: teoria*. Treccani.it, 2010. [Online]. Available: https://www.treccani.it/enciclopedia/informazione-e-computazione-quantistica-teoria_%28XXI-Secolo%29/. [Accessed: 28- Dec- 2021]
- [30] M. Sandri, *Primi passi verso l'intelligenza artificiale quantistica*. MEDIA INAF, 2021. [Online]. Available: <https://www.media.inaf.it/2021/10/28/quantum-ai/>. [Accessed: 28- Dec- 2021]

