

MACCHINE, CALCOLO E PENSIERO

Marco Giunti
giunti@unica.it

Lavoro: +39 0706757135

Fax: +39 0706757337

Roberto Giuntini
giuntini@unica.it

Lavoro: +39 0706757299

Fax: +39 0706757337

*Dipartimento di Scienze Pedagogiche e Filosofiche, Università di Cagliari
via Is Mirrionis 1, 09123 Cagliari, ITALY*

MACCHINE, CALCOLO E PENSIERO

1. Introduzione

L'ormai classico articolo di Turing del 1950, *Computing Machinery and Intelligence*, comincia con la secca domanda: "Possono pensare le macchine?" La risposta che Turing propose ha avuto profonde influenze non solo sullo sviluppo successivo dell'intelligenza artificiale da un lato e della scienza cognitiva dall'altro, ma anche sul dibattito più propriamente filosofico. Da quel momento, la filosofia della mente più avveduta non si è più interrogata soltanto sulle capacità e i limiti del pensiero umano, ma ha dovuto anche occuparsi del rapporto fra pensiero e macchine e, in particolare, del rapporto con quelle macchine, i calcolatori digitali, al cui sviluppo Turing dette contributi fondamentali, sia teorici che pratici.

In questo lavoro, ci ripromettiamo di ripercorrere alcuni dei passaggi teorici più significativi che, a partire dall'articolo di Turing del 1950, hanno caratterizzato il dibattito su mente e macchine in intelligenza artificiale, scienza cognitiva e filosofia della mente. In particolare, nel secondo paragrafo, ricostruiamo sinteticamente le posizioni di Turing 1950 e sosteniamo che, in quell'articolo, egli sembra già suggerire quella che poi è stata chiamata *Tesi Computazionale della Mente*. Nel terzo paragrafo, analizziamo alcune delle più note critiche al Turing test, fra cui l'argomento della stanza cinese di Searle. Nel quarto, esponiamo una famosa risposta dei coniugi Churchland a Searle e ci soffermiamo poi sulla versione *connessionista* della tesi computazionale della mente proposta dai Churchland. A proposito di tale versione, solleviamo il dubbio che l'interpretazione *computazionale* del connessionismo propugnata dai Churchland non sia sufficientemente motivata da un punto di vista fondazionale. Nel par. 5, dopo aver considerato il rapporto fra tesi computazionale della mente e diverse formulazioni della tesi di Church-Turing, arriviamo a concludere che la versione connessionista della tesi computazionale non è in effetti sostenibile nella forma proposta dai Churchland. Infine, nel paragrafo conclusivo, indicheremo due diverse direzioni per una possibile revisione di tale tesi.

2. Macchine e intelligenza in Turing

Nel paragrafo iniziale (*Il gioco dell'imitazione*) dell'articolo del 1950, dopo aver posto la domanda "Possono pensare le macchine?", Turing propone subito di sostituirla con una più precisa, a cui si possa dare una risposta non ambigua e che non dipenda dal significato comunemente attribuito ai termini "macchina" e "pensare". La proposta di Turing si basa su un'ingegnosa prova, da lui denominata *gioco dell'imitazione* e oggi comunemente nota come *Turing test*, che può essere sinteticamente descritta come segue. Un interrogante pone domande di contenuto libero a due interlocutori, una macchina e un essere umano, di cui non conosce l'identità; egli cerca di determinare quale dei due sia la macchina esclusivamente attraverso le loro risposte. La macchina è costruita in modo da imitare il tipo di risposte che sarebbero date da un essere umano. Turing domanda quindi se possa esistere una macchina che, in una serie di ripetizioni del gioco, sia capace di indurre in errore gli interroganti altrettanto spesso di quando gli

interlocutori siano ambedue esseri umani (cioè, il 50% delle volte). Egli propone quindi di *sostituire* questa nuova domanda a quella originale.

Nel paragrafo immediatamente successivo (*Critica del nuovo problema*) Turing si preoccupa di stabilire se la nuova domanda sia adeguata, dando due ragioni per ritenerla tale. Primo, il criterio proposto, basandosi esclusivamente sul metodo delle domande e delle risposte, permette di saggiare soltanto gli aspetti puramente intellettuali dei due interlocutori, distinguendoli nettamente da quelli fisici. Siccome tale criterio deve potersi applicare a interlocutori che differiscono radicalmente dal punto di vista fisico (un uomo e una macchina), ciò è certamente un punto a favore del criterio stesso. Secondo, tale criterio permette di saggiare le capacità intellettuali dei due interlocutori in modo molto ampio, in quanto, non essendoci limitazioni al contenuto delle domande, esse possono vertere su qualunque campo della conoscenza umana che l'interrogante decida di investigare. Sulla base di queste considerazioni, Turing sembra non nutrire alcun dubbio che una macchina capace di giocare in modo soddisfacente il gioco dell'imitazione debba essere ritenuta intelligente e sia dotata di pensiero. In altre parole, per Turing, passare il test è sicuramente una *condizione sufficiente* per affermare l'intelligenza di una macchina.

Al contrario, Turing nutre seri dubbi sul test come condizione necessaria. Infatti egli fa notare che il test è troppo sfavorevole alle macchine, in quanto, se chiedessimo a un uomo di fare calcoli a una velocità paragonabile a quella di un calcolatore digitale, egli fallirebbe miseramente. Il senso di questa considerazione è quello di insinuare il dubbio che possano esistere forme di intelligenza radicalmente diverse da quella umana. Ma allora, un test che richiedesse semplicemente di imitare le capacità umane sarebbe del tutto inadatto a rilevare la presenza di un'intelligenza di tipo radicalmente diverso. Turing afferma esplicitamente che questo tipo di obiezione è molto forte. Possiamo quindi concludere che, per Turing, non è affatto scontato che passare il test sia una condizione necessaria per affermare l'intelligenza di una macchina, fermo restando invece il suo giudizio positivo riguardo al test come condizione sufficiente.¹

Nei tre paragrafi seguenti (*Le macchine interessate al gioco, Calcolatori digitali, Universalità dei calcolatori digitali*) Turing prima di tutto suggerisce che, al momento in cui egli scrive, esiste già un tipo di macchine (i calcolatori digitali) per il quale ha senso ipotizzare in futuro un esito positivo del test. Per questa ragione, egli propone innanzi tutto di riservare a tali macchine la partecipazione al gioco. Avendo così delimitato l'ambito del test, Turing passa a spiegare quale sia la struttura generale di un calcolatore digitale. Esso, da un punto di vista puramente funzionale, è costituito da tre parti interagenti: (a) memoria; (b) unità operativa; (c) governo, o controllo. La memoria contiene sia i dati su cui vengono effettuati i calcoli, sia i programmi, cioè le regole o istruzioni, per effettuare tali calcoli; l'unità operativa modifica i dati contenuti nella memoria seguendo le istruzioni fornite dal programma; infine, il controllo fa in modo che l'unità operativa esegua le istruzioni del programma nella giusta sequenza.

Turing sottolinea quindi che i calcolatori digitali hanno la capacità di riprodurre qualunque attività di calcolo sia compiuta da un calcolatore umano. Per attività di calcolo umana egli intende una qualunque trasformazione di simboli prodotta da un essere umano attraverso l'applicazione di regole formali, col solo ausilio di carta e penna e senza l'uso di particolare intelligenza o ingegno. La proprietà che sta alla base di questa notevole capacità dei calcolatori digitali è la loro *universalità*. I calcolatori digitali sono universali in quanto sono in grado di eseguire *qualunque* programma sia contenuto in un'opportuna sezione della loro memoria. Una volta caricato il

programma, il controllo farà in modo che le singole istruzioni vengano eseguite in una successione determinata di passi, successione che in generale dipenderà sia dal programma stesso sia dai dati iniziali, contenuti in un'altra sezione della memoria. Per riprodurre l'attività di un calcolatore umano, si tratterà allora, semplicemente, di scrivere in forma di programma (o tavola di istruzioni) le regole che egli esegue quando compie i suoi calcoli, e di caricare poi tale programma nell'opportuna sezione della memoria del calcolatore digitale.

Sulla base di queste considerazioni, alla fine del paragrafo intitolato *Universalità dei calcolatori digitali*, Turing propone la forma definitiva della domanda iniziale, chiedendo se esistano calcolatori digitali che, forniti di sufficiente memoria e velocità di esecuzione, possano, sulla scorta di una programmazione adeguata, passare il test del gioco dell'imitazione. Subito dopo, all'inizio del paragrafo successivo (*Opinioni contrarie a proposito dell'argomento principale*), Turing esprime la sua opinione al riguardo:

Credo che entro cinquant'anni sarà possibile programmare calcolatori con una capacità di memorizzazione di circa 10^9 , per fare giocare loro il gioco dell'imitazione così bene che un esaminatore medio non avrà più del 70 per cento di probabilità di compiere l'identificazione esatta dopo cinque minuti di interrogazione. Credo che la domanda iniziale: "Possono pensare le macchine?", sia troppo priva di senso per meritare una discussione. Ciò nonostante credo che alla fine del secolo l'uso delle parole e l'opinione corrente si saranno talmente mutate che chiunque potrà parlare di macchine pensanti senza aspettarsi di essere contraddetto. (Turing 1950, trad. it. 1994, 133)

L'opinione di Turing è chiara: è più che ragionevole ipotizzare che, già in un futuro prossimo (entro cinquant'anni), i calcolatori digitali possano giocare il gioco dell'imitazione abbastanza bene, avvicinandosi in modo consistente al risultato ottimale del 50 per cento di probabilità di risposte errate. Ciò, secondo Turing, dovrebbe anche contribuire a una più ampia diffusione dell'idea che possano esistere macchine pensanti.

Non ci interessa in questa sede affrontare la questione, peraltro interessante, se oggi, dopo ormai più di cinquant'anni dalla sua formulazione, la previsione di Turing si sia avverata.² Piuttosto, vogliamo domandarci quali siano le ragioni che possono aver spinto Turing a ritenerla altamente credibile. Su questo punto, Turing 1950 non è molto esplicito, riconoscendo anzi di non avere argomentazioni molto convincenti di carattere positivo per sostenere il suo punto di vista.³ Tuttavia, la lettura attenta di tutto il saggio e, in particolare, di alcuni passi dell'ultimo paragrafo (*Macchine che apprendono*), suggerisce con forza che Turing, pur senza formularla esplicitamente, accetti già quella che poi è stata chiamata *Tesi Computazionale della Mente (TCM)*, o anche *Tesi Funzionalista* (Dalla Chiara, Giuntini e Paoli 2004, 128). Secondo tale tesi:

TCM Tutto il pensiero umano è riconducibile ad attività di tipo algoritmico, cioè a trasformazioni di simboli in base a regole formali esplicitamente formulabili ed eseguibili in modo puramente meccanico.⁴

Il punto interessante da notare è che l'esistenza, in linea di principio, di calcolatori digitali che passino il test di Turing è una conseguenza immediata di questa tesi e della loro universalità. Infatti, essendo i calcolatori digitali universali, essi hanno la capacità di eseguire qualunque programma venga inserito in memoria. Ne segue che, una volta che saremo stati capaci di scoprire le regole algoritmiche che stanno alla base del pensiero umano, le potremo fornire a un calcolatore digitale che, eseguendole, potrà così giocare adeguatamente il gioco dell'imitazione, risultando quindi intelligente e dotato esso stesso di pensiero. E' proprio questo tipo di argomentazione che sembra essere suggerita da Turing nell'ultimo paragrafo del saggio del 1950.

3. Critiche al Turing test e alla tesi computazionale della mente (French, Block, Searle)

Il test di Turing è da molti anni al centro di un ampio dibattito (si veda Shieber 2004), ancora oggi ben vivo. In questo paragrafo prenderemo in considerazione tre fra le critiche più note che sono state rivolte al test. Come vedremo, esse attaccano il test da punti di vista diversi. Il primo argomento che prenderemo in considerazione (French 1990) mette in dubbio che passare il test sia una condizione necessaria per affermare la presenza del pensiero.⁵ Come abbiamo visto nel paragrafo precedente, anche Turing aveva già sollevato seri dubbi al proposito. Gli altri due argomenti (Block 1981; Searle 1980, 1990) mettono invece in discussione il test come condizione sufficiente. Inoltre, mentre sia l'argomento di French sia quello di Block risultano comunque consistenti con la tesi computazionale della mente *TCM*, quello di Searle, oltre che una critica alla sufficienza del test di Turing, costituisce anche un forte attacco contro la stessa *TCM*.

L'argomento di French sottolinea che, per passare il Turing test, è necessario possedere e utilizzare tutta una serie di capacità di tipo subcognitivo, quali per esempio quelle relative ai processi di associazioni di idee o al riconoscimento delle connotazioni affettive del linguaggio. Per French, è molto difficile ipotizzare che un calcolatore digitale possa mai arrivare a padroneggiare tali capacità, in quanto è altamente improbabile che esse siano esprimibili mediante esplicite regole formali, e dunque traducibili in adeguati programmi. L'unico modo per ottenere tali capacità sarebbe infatti quello di vivere in prima persona situazioni in tutto simili a quelle vissute dagli esseri umani, cosa che, per ovvie ragioni, è preclusa a un calcolatore digitale. Se l'obiezione di French fosse fondata, sarebbe perciò sempre possibile scoprire quale dei due interlocutori sia il calcolatore: l'interrogante dovrebbe semplicemente fare domande che vanno a saggiare le loro capacità subcognitive. Tuttavia, sebbene tali capacità siano necessarie per passare il Turing test, French sostiene che esse non sono costitutive di tutte le forme di pensiero. Per French, è infatti perfettamente ragionevole ipotizzare forme di intelligenza che prescindano da tali capacità. Queste forme, ovviamente, sarebbero di tipo radicalmente diverso rispetto a quella umana, ma non per questo dovremmo escluderle dall'ambito del pensiero.

Come abbiamo visto nel paragrafo precedente, anche Turing aveva ipotizzato la possibilità di forme di intelligenza radicalmente diverse da quella umana e aveva anche esplicitamente notato che il suo test non sarebbe stato in grado di rilevarle. L'obiezione di French sviluppa e rende più esplicita l'intuizione di Turing, focalizzando in particolare la questione sulle capacità subcognitive. Rispetto a tali capacità, non è poi del tutto chiaro se French le ritenga *di natura* non algoritmica, oppure soltanto troppo

complesse per poter essere *di fatto* scritte nella forma di un programma. Qualunque sia la risposta a questa domanda, la posizione di French è comunque consistente con *TCM*, perché, come detto, tali capacità non devono essere considerate caratteristiche essenziali del pensiero.

L'argomento di Block propone di considerare una macchina ideale che (i) sarebbe ovviamente in grado di passare il Turing test, (ii) applicando però una procedura completamente priva di ingegno o intelligenza. Ne segue quindi che il test non è una condizione sufficiente per l'intelligenza di una macchina. Vediamo adesso i dettagli dell'argomento. La macchina di Block ha una memoria finita, ma sufficientemente grande da poter immagazzinare tutte le conversazioni sensate fra due persone di una lunghezza prefissata, e comunque non inferiore a quella della più lunga serie di domande e risposte che sarà mai effettuata durante un test di Turing. Tale ipotesi è ben posta perché, per motivi fisici, la lunghezza di un qualunque test di Turing deve avere un limite superiore finito. Il numero di tali conversazioni sensate è perciò finito, ed esse possono quindi essere tutte immagazzinate in una memoria finita. Supponiamo adesso che la macchina di Block partecipi al gioco dell'imitazione e che la prima domanda sia x_1 ; la macchina cerca allora nella memoria una conversazione che inizia per x_1 (se la domanda x_1 ha senso, l'ipotesi fatta assicura che una conversazione che inizi con x_1 esista nella memoria della macchina). Trovata la conversazione, la macchina risponde con il secondo elemento di tale sequenza, sia esso x_2 . A questo punto, l'interrogante farà un'altra domanda x_3 . La macchina cercherà ora in memoria una conversazione che inizia con $x_1 x_2 x_3$. Tale conversazione deve esistere per la stessa ragione descritta sopra. Trovata la conversazione, la macchina risponderà con il suo quarto elemento x_4 , e così via. La macchina di Block sarà così in grado di passare il Turing test. Ma, come lo stesso Block nota, essa avrà al massimo l'intelligenza di un juke-box. Ne segue perciò che il test di Turing non è un criterio sufficiente per l'attribuzione di intelligenza.

L'argomento di Block mette in luce che, per poter parlare di intelligenza, non ci si può limitare soltanto a simulare perfettamente il comportamento verbale di un essere umano, ma è invece cruciale il *modo* in cui si ottiene tale simulazione. La macchina di Block rende evidente che possono esserci modi di passare il Turing test che non sono intelligenti. Possiamo quindi concludere che, alla luce di questo argomento, è difficile continuare a sostenere che tale test costituisca un criterio sufficiente di intelligenza.⁶

Al contrario, la tesi computazionale della mente *TCM* non è affatto toccata dall'argomento di Block. Tuttavia, esso ha un'importante conseguenza *metodologica* per i sostenitori di tale tesi. In generale, il fatto che un programma sia capace di simulare, anche in modo estremamente raffinato, importanti aspetti del comportamento umano non è in alcun modo sufficiente per sostenere che tale programma corrisponda, in tutto o in parte, ai reali processi di pensiero (supposti comunque di tipo computazionale) che stanno alla base di tale comportamento. Dunque, l'argomento di Block ci fa capire che il mero *simulazionismo* non può costituire una metodologia adeguata per una *scienza* cognitiva di tipo computazionale.

L'argomento di Searle è forse il più noto dei tre che stiamo qui considerando, tanto da essersi meritato anche un nome ben preciso; esso è infatti solitamente chiamato l'argomento della *stanza cinese*. Searle ci propone un curioso esperimento mentale. Egli immagina di essere chiuso in una stanza che comunica con l'esterno soltanto attraverso una feritoia. All'esterno della stanza ci sono dei signori cinesi che scrivono domande, in cinese, su alcuni fogli di carta e quindi passano tali fogli a Searle attraverso la feritoia. Searle è di lingua madre inglese e non conosce assolutamente il cinese,

addirittura, non sa neanche riconoscere che i segni sui fogli che riceve siano ideogrammi di quella lingua. Tuttavia, all'interno della stanza, Searle dispone di un grosso e dettagliato libro, scritto in inglese, che gli dice, esclusivamente attraverso descrizioni della *forma* dei segni, quali altri segni egli deve scrivere in risposta. Ricevuto un foglio, Searle consulta quindi il libro delle regole, scrive la risposta seguendo le istruzioni del libro e la passa all'esterno ai signori cinesi. I signori all'esterno, comprendendo il cinese, capiscono le risposte scritte da Searle, ed essendo tali risposte pienamente sensate, sono certi che nella stanza ci sia qualcuno che, come loro, è capace di intendere il cinese. Sappiamo invece che Searle non conosce affatto quella lingua e quindi non è assolutamente in grado di comprendere né il significato dei segni che riceve, né di quelli che egli stesso produce. Inoltre, le mere manipolazioni formali che Searle compie seguendo le regole del libro non potranno neanche mai permettergli di imparare il significato di tali segni. La conclusione generale che Searle trae è che la semantica o l'intenzionalità non possono essere il prodotto di una mera esecuzione di regole formali.

Questa conclusione, se davvero giustificata, ha conseguenze devastanti sia per il Turing test come criterio sufficiente di intelligenza, sia per la stessa tesi computazionale della mente *TCM*. Per quanto riguarda il Turing test, è evidente l'analogia fra l'esperimento della stanza cinese e la situazione di un calcolatore digitale che passi tale test. Il calcolatore digitale, proprio come Searle chiuso nella stanza, dà una serie di risposte sensate a una serie di domande, e il modo in cui sia Searle sia il calcolatore digitale producono tali risposte è sostanzialmente lo stesso, perché ambedue non fanno nient'altro che eseguire regole formali (le istruzioni del libro per Searle, quelle del programma per il calcolatore digitale). Ma allora, se la semantica o l'intenzionalità non possono essere il prodotto di una mera esecuzione di regole formali, il calcolatore digitale, che non fa nient'altro, sarà privo di tali attributi. D'altra parte, però, il pensiero e l'intelligenza non possono essere privi di semantica o intenzionalità. Ne segue quindi che il calcolatore digitale, pur passando il Turing test, non pensa, né è intelligente.

Per quanto riguarda *TCM*, poi, la conseguenza negativa è ancora più diretta. *TCM* afferma infatti che il pensiero *consiste* di trasformazioni di simboli ottenute mediante la mera esecuzione di regole formali. Ma allora, congiungendo *TCM* con la conclusione di Searle, si ottiene che il pensiero è privo di semantica o intenzionalità, il che è ovviamente assurdo.

L'argomento della stanza cinese ha una notevolissima presa intuitiva ed è perciò altamente persuasivo. Ciò non toglie che, a un esame più approfondito, esso presenti molti punti deboli. Vedremo nel prossimo paragrafo come un ingegnoso argomento parallelo, ideato dai coniugi Churchland, ne metta in evidenza alcuni, particolarmente rilevanti.

4. I Churchland contro Searle e le nuove prospettive del Connessionismo

In un noto dibattito svoltosi sulla rivista *Scientific American*, i coniugi Paul e Patricia Churchland (1990) presentarono un argomento analogo a quello della stanza cinese, da loro denominato della *stanza luminosa*, il cui intento è mostrare come l'argomento originale di Searle si fondi in realtà sull'indebita assunzione di alcune premesse. Una volta esplicitato questo fatto, l'argomento della stanza cinese perde gran parte della sua forza apparente.

I Churchland immaginano che, poco dopo la formulazione della teoria di Maxwell, che implica che la luce sia costituita di onde elettromagnetiche, un critico di tale teoria proponga il seguente esperimento mentale. Il critico, chiuso in una stanza buia, tenendo in mano un magnete, lo muove velocemente avanti e indietro. Secondo la teoria dell'elettromagnetismo, il movimento del magnete produce onde elettromagnetiche e quindi, se la luce è costituita di tali onde, il semplice movimento del magnete produrrà luce. Ma, per quanto il critico agiti furiosamente il magnete, la *luminosità*, che è una proprietà intrinseca della luce, non si produce affatto nella stanza. Il critico conclude quindi, in generale, che la luminosità non può essere il prodotto di un mero movimento meccanico di oggetti fisici quali i magneti. Data questa conclusione, egli infine afferma che la luce stessa non può essere costituita di onde elettromagnetiche, perché, se lo fosse, essa sarebbe priva di una sua proprietà intrinseca, e cioè la luminosità.

Come primo punto, i Churchland notano che, se questo argomento fosse stato effettivamente presentato poco dopo la formulazione della teoria di Maxwell, esso avrebbe probabilmente avuto lo stesso forte fascino che oggi ha per noi l'argomento della stanza cinese. Ma oggi, è per noi facile capire perché il fascino dell'argomento della stanza luminosa sia in effetti del tutto illusorio. Il problema sta nel fatto che l'argomento assume indebitamente la verità di tutte le sue premesse, basandosi soltanto sulle opinioni prevalenti del tempo. In particolare, se il movimento del magnete produce effettivamente luce (cioè onde elettromagnetiche con frequenze comprese entro limiti ben precisi), non è affatto vero che la luminosità non si produrrà nella stanza. In effetti, la luminosità non si produce se il magnete non oscilla con frequenza sufficientemente elevata; ma, se questo è il caso, non si produrrà neanche la luce stessa, cioè un'onda elettromagnetica con la giusta frequenza. L'argomento ha perciò almeno una premessa falsa e non è quindi corretto. Ciò nonostante, l'argomento può *sembrare* corretto. Infatti, se ci si basa soltanto sul senso comune del tempo (che non sa niente della teoria di Maxwell), è quasi inevitabile assumere la verità di *tutte* le premesse.

Una volta chiarito che l'argomento della stanza luminosa non è corretto, e data una plausibile spiegazione dell'origine della sua forte presa intuitiva, anche l'argomento della stanza cinese può essere visto in una diversa prospettiva. Prima di tutto, notiamo la stretta analogia fra i due argomenti, attraverso le seguenti corrispondenze: luce \approx pensiero o intelligenza; luminosità \approx semantica o intenzionalità; movimento manuale del magnete \approx manipolazioni simboliche operate da Searle; la luce è costituita di onde elettromagnetiche \approx TCM. Date queste corrispondenze, possiamo riformulare l'argomento originale di Searle in modo da farne risaltare l'analogia strutturale con quello dei Churchland. Searle, chiuso in una stanza, risponde a ideogrammi cinesi con altri ideogrammi cinesi utilizzando il grosso libro delle regole. Le manipolazioni simboliche operate da Searle sono ottenute mediante la mera esecuzione di regole formali e quindi, se il pensiero consiste di trasformazioni formali di simboli, le semplici manipolazioni di Searle produrranno pensiero. Ma, per quanto Searle manipoli accuratamente i simboli, la semantica o l'intenzionalità non si producono affatto. Searle conclude quindi, in generale, che la semantica o l'intenzionalità non possono essere il prodotto di una mera esecuzione di regole formali. Data questa conclusione, egli infine afferma che il pensiero stesso non può consistere di trasformazioni di simboli ottenute mediante la mera esecuzione di regole formali, perché, se il pensiero si riducesse a ciò, esso sarebbe privo di una sua proprietà intrinseca, e cioè la semantica o l'intenzionalità.

Avendo messo in questa forma l'argomento della stanza cinese, è facile capire che Searle sta in realtà assumendo, ma non argomentando, che *qualunque* siano le

manipolazioni simboliche da lui operate, la semantica o l'intenzionalità non si produrranno. Ma un seguace di *TCM* può allora facilmente ribattere affermando che, se le manipolazioni simboliche operate da Searle producono davvero pensiero (perché si basano sull'esecuzione di *appropriate* regole formali), non è affatto vero che la semantica non si produrrà. In effetti, essa non si produce se le manipolazioni simboliche non sono appropriate; ma, se questo è il caso, non si produrrà neanche lo stesso pensiero, cioè trasformazioni simboliche basate sull'esecuzione delle *giuste* regole formali.

La critica dei Churchland all'argomento della stanza cinese sarebbe ancora più convincente se, come fa la teoria di Maxwell nel caso della luce, fossimo in grado di dire, esattamente, quali siano le *appropriate* regole formali la cui esecuzione sta alla base del pensiero. Infatti, la teoria di Maxwell non afferma soltanto, in modo generico, che la luce è costituita di onde elettromagnetiche, ma delimita anche esattamente il *tipo* di onde elettromagnetiche che la costituiscono (tutte quelle entro una ben precisa gamma di frequenze). Gli stessi Churchland sono ben consapevoli che la loro controargomentazione dovrebbe essere completata con questo non secondario dettaglio; sebbene essi riconoscano esplicitamente di non avere una soluzione soddisfacente del problema, si preoccupano però di indicare almeno una direzione di ricerca che, a loro avviso, è estremamente promettente. Tale direzione è quella fornita dall'approccio connessionista.

La tesi *TCM*, nella sua formulazione classica (si veda per es. Newell e Simon 1972; Newell 1980; Pylyshyn 1984), postula una stretta analogia fra cervello e mente dell'uomo da un lato e hardware e software di un calcolatore digitale dall'altro. Ciò è stato sintetizzato nella nota formula secondo cui il cervello sta alla mente come l'hardware sta al software. Più esplicitamente, ciò significa che il cervello costituirebbe la realizzazione fisica di una macchina cognitiva universale (*physical symbol system*, secondo la terminologia di Newell 1980) che avrebbe un'organizzazione funzionale strettamente analoga a quella di un calcolatore digitale. La memoria di tale macchina cognitiva, implementata dal nostro cervello, conterrebbe strutture simboliche più o meno complesse (strutture di dati) e regole per la loro utilizzazione o modificazione (programmi). Ci sarebbero poi un controllo centrale e opportuni meccanismi operativi, anch'essi implementati dal cervello, che farebbero in modo che le strutture simboliche contenute in memoria siano effettivamente modificate secondo quanto prescritto dalle regole. Caratteristica fondamentale delle strutture simboliche sarebbe quella di costituire *rappresentazioni* di situazioni o eventi (sia esterni sia interni). Il pensiero o, più in generale la cognizione, non sarebbe allora nient'altro che l'attività stessa di questa complessa macchina cognitiva implementata dal nostro cervello.

L'analogia fra cervello-mente e calcolatore digitale (nelle sue due componenti hardware-software) ha costituito il tacito presupposto di gran parte della ricerca in intelligenza artificiale e nella scienza cognitiva fino a circa la fine degli anni '70 del secolo scorso. Ma negli anni '80, con la rinascita dell'approccio connessionista (Rumelhart e McClelland 1986), la formulazione classica di *TCM* ha cominciato a essere messa seriamente in discussione.

L'approccio connessionista utilizza infatti modelli molto diversi da quelli simbolici dell'approccio computazionale classico. I sistemi connessionisti sono costituiti da un numero elevato di semplici unità di elaborazione (neuroni artificiali), organizzate in una rete mediante connessioni fra le uscite e le entrate delle diverse unità (rete neurale). Ciascuna unità emette una risposta in funzione del segnale globale ricevuto e,

eventualmente, della propria soglia di attivazione. Il segnale in uscita, attraverso le opportune connessioni, viene quindi inviato ad altri neuroni, che a loro volta rispondono con un altro segnale e così via. Inoltre, ciascuna connessione è caratterizzata da un peso, che modifica l'intensità del segnale trasmesso attraverso quella connessione.

Fissato il peso di ogni connessione, il livello di attivazione di tutte le unità a un dato istante determina il livello di attivazione di ciascuna unità a un qualunque istante successivo. Una rete neurale può perciò essere pensata come un sistema dinamico (Smolensky 1988), il cui stato completo istantaneo è dato dal livello di attivazione di tutte le sue unità. Cambiando i pesi delle connessioni, però, lo stesso stato completo produrrà, in generale, stati successivi diversi. Modificare i pesi delle connessioni permette quindi di modificare la dinamica del sistema in risposta allo stesso stato iniziale. Ma ciò significa che una rete neurale non è "condannata" a produrre sempre lo stesso comportamento in risposta allo stesso input. Dato un certo input, se la risposta della rete non è adeguata, si può fare in modo di migliorarla semplicemente aggiustando i pesi delle diverse connessioni della rete stessa. E' proprio questa proprietà molto generale delle reti neurali che è alla base della loro capacità di apprendere, sia autonomamente in base all'esperienza, sia con l'aiuto di un supervisore esterno. Le reti neurali sono oggi impiegate in moltissimi campi, tra i quali l'informatica (compressione di dati, eliminazione del rumore, riconoscimento di segnali sonar, riconoscimento di caratteri, riconoscimento vocale), l'analisi finanziaria, la medicina, l'intelligenza artificiale e la scienza cognitiva.

L'analogia fra i sistemi connessionisti e ciò che sappiamo dell'organizzazione e del funzionamento del cervello è più che evidente. Il nostro cervello contiene circa cento miliardi di neuroni, ciascuno dei quali ha circa mille connessioni con altri neuroni. La frequenza del segnale prodotto da ciascun neurone dipende dal segnale globale proveniente dai neuroni a cui esso è connesso in entrata attraverso la sinapsi. In uscita, il segnale prodotto è quindi inviato, tramite gli assoni, alle sinapsi di altri neuroni. Date queste analogie e le notevoli capacità dimostrate dai sistemi connessionisti nella simulazione di compiti di tipo cognitivo, i Churchland (1990; si veda anche Smith Churchland 1986 e Churchland 1995) ipotizzano che il pensiero non sia nient'altro che l'attività di calcolo delle complesse reti costituite dai neuroni del nostro cervello.

E' importante tenere presente che, secondo i Churchland, l'attività costitutiva del pensiero sarebbe comunque di tipo *computazionale*, anche se le computazioni svolte da una rete neurale sono radicalmente diverse da quelle di un calcolatore digitale. In una rete neurale, infatti, l'informazione è elaborata in parallelo da molte unità di elaborazione elementari; in un passo, vengono cioè compiute tante operazioni elementari quante sono le unità che costituiscono la rete. Al contrario, in un calcolatore digitale, l'elaborazione è seriale, perché c'è un'unica unità di calcolo che, a ogni passo, compie un numero molto limitato di operazioni elementari. Inoltre, mentre i calcoli di un calcolatore digitale dipendono dall'esecuzione di regole esplicitamente formulate (i programmi), quelli di una rete neurale non sono il risultato dell'esecuzione di regole, ma della stessa costituzione della rete, sia per quanto riguarda la particolare funzione input-output di ciascuna unità di elaborazione, sia per l'architettura e il peso delle connessioni. Infine, mentre la formulazione classica di *TCM* presuppone che le strutture simboliche costituiscano rappresentazioni esplicite e localizzate in una ben definita sezione della memoria, nelle reti neurali le rappresentazioni non sono né esplicite né localizzate, in quanto esse dipendono, in ultima analisi, dalla distribuzione dei pesi delle

connessioni di tutta la rete; in generale, tale distribuzione determina in modo dinamico l'immagazzinazione simultanea di molte rappresentazioni.

Possiamo quindi affermare che i Churchland, e con loro molti altri sostenitori dell'approccio connessionista, hanno in realtà proposto una nuova formulazione della tesi *TCM*, che possiamo chiamare *Tesi Computazionale Connessionista della Mente (TCCM)*. Essa, a differenza della tesi classica, non si basa sull'analogia fra cervello/mente e calcolatore digitale ma, piuttosto, su quella con le reti neurali. Tale tesi può essere posta nella forma seguente:

TCCM Tutto il pensiero umano è riconducibile ad attività di calcolo del tipo di quelle condotte da un sistema connessionista.

Da un punto di vista fondazionale, tuttavia, la domanda che sorge spontanea rispetto a *TCCM* è se davvero siamo giustificati ad assumere in modo acritico che l'attività di una rete neurale sia un'attività *di calcolo*. La questione non è né secondaria, né puramente terminologica, perché mette in discussione il contenuto stesso della nostra nozione di *computazione*, nonché i suoi limiti di applicabilità. Il punto è che, date le profonde differenze fra calcolatori digitali e sistemi connessionisti, non si può dare per scontato che i secondi non siano nient'altro che un ulteriore tipo di sistemi computazionali, quali per esempio, gli automi finiti, le macchine di Turing o le macchine a registri. In effetti, se paragoniamo le reti neurali a questi tipi paradigmatici di sistema computazionale, sono molto più evidenti le differenze che non le analogie. Ma allora, come possiamo essere certi che ciò che una rete neurale fa possa essere sensatamente descritto come una computazione? E, conseguentemente, come possiamo essere certi che *TCCM* sia davvero, e soltanto, una nuova formulazione della tesi *computazionale* della mente? Per poter affrontare queste domande, è però necessario fare un passo indietro, chiarendo prima quali siano gli esatti rapporti fra varie formulazioni della tesi di Church-Turing da un lato, e della tesi computazionale della mente dall'altro.

5. Tesi di Church-Turing e tesi computazionale della mente

In quello che oggi è considerato il primo vero e proprio manuale di logica dei predicati, Hilbert e Ackermann (1928, ch. 3) avevano richiamato l'attenzione in modo esplicito sull'*Entscheidungsproblem*, ovvero, il problema di decidere, mediante una procedura puramente meccanica, se un qualunque enunciato della logica del primo ordine sia universalmente valido. Secondo Hilbert e Ackermann tale problema, difficile e ancora irrisolto, era da considerarsi il problema principale della logica matematica. Essi, inoltre, avevano sottolineato l'importanza del problema anche per tutte quelle teorie che si basano su un numero finito di assiomi; per tali teorie, infatti, la soluzione dell'*Entscheidungsproblem* avrebbe dato la possibilità di determinare effettivamente, a meno soltanto di limitazioni pratiche, se un qualunque enunciato sia o no conseguenza logica degli assiomi.

Pochi anni dopo, Alonso Church, basandosi sul concetto di funzione numerica lambda-definibile (Church 1932; Kleene 1935), stabilì che l'*Entscheidungsproblem* non è risolvibile (Church 1936b), ovvero, che non esiste una procedura meccanica capace di decidere se un qualunque enunciato della logica del primo ordine sia universalmente valido. Church (1936a) dimostrò inoltre che la lambda-definibilità è equivalente alla

ricorsività di Herbrand (1932) e Gödel (1934). La soluzione negativa dell'*Entscheidungsproblem* presupponeva però l'assunzione di un'ipotesi oggi nota come *Tesi di Church (TC)*:

TC Le funzioni numeriche effettivamente calcolabili in senso intuitivo sono tutte e sole le funzioni ricorsive (o, in modo equivalente, quelle lambda-definibili).

In un primo momento, Church (1936a) propose di assumere *TC* come una mera *definizione* del concetto intuitivo di funzione effettivamente calcolabile, ma in questa forma la sua proposta non poteva essere soddisfacente. Il problema, infatti, non consisteva soltanto nel rimpiazzare la vaga nozione intuitiva di funzione effettivamente calcolabile con un'altra formalmente ineccepibile; piuttosto, si trattava anche di *giustificare* tale sostituzione in base a qualche argomento che assicurasse, o per lo meno rendesse altamente plausibile, che le due nozioni (intuitiva e formale) avessero *identica* estensione. Ora, mentre il modo stesso in cui una funzione ricorsiva è definita assicura che i suoi valori possano sempre essere effettivamente calcolati da chiunque comprenda tale definizione, non è altrettanto evidente che, se una funzione è calcolabile da un essere umano attraverso l'esecuzione meccanica di una serie ben specificata di regole, tale funzione debba anche poter essere definita in modo ricorsivo. Infatti, se non sappiamo descrivere, in generale, il *tipo* di regole che possono essere eseguite nel calcolo di una funzione, è molto difficile, se non impossibile, argomentare che una funzione calcolabile in base a tali regole sia anche ricorsivamente definibile. E' noto che, proprio per la mancanza di un argomento soddisfacente al riguardo, Gödel stesso nutriva seri dubbi sull'adeguatezza del suo concetto di funzione ricorsiva, nonché di quello equivalente (lambda-definibilità) di Church.

In questa situazione di sostanziale stallo si inserì l'approccio radicalmente innovativo di Turing. Per Turing, infatti, la questione veramente fondamentale, la cui soluzione avrebbe poi anche permesso di giustificare la tesi di Church, era prima di tutto quella di costruire un modello adeguato e generale delle attività di calcolo umane. Da un punto di vista intuitivo, le *attività di calcolo di un essere umano* possono essere identificate con tutte quelle sue attività che consistono nell'esecuzione di procedure puramente meccaniche o effettive, mentre una *procedura meccanica* può essere caratterizzata come un insieme finito di regole formali non ambigue per la trasformazione di simboli; a partire da una serie finita di dati, tali regole debbono poter essere eseguite da un essere umano in una successione determinata di passi, con il solo ausilio di carta e penna e senza l'uso di particolare intelligenza o ingegno.⁷

Nel celebre saggio "On computable numbers, with an application to the Entscheidungsproblem", Turing (1937) innanzitutto definisce un tipo di macchina ideale capace di condurre calcoli. Tali macchine, da lui semplicemente denominate *computing machines* (macchine calcolatrici), sono oggi note come *macchine di Turing*. Nei primi otto paragrafi del saggio, Turing dimostra una serie di importanti risultati riguardanti le capacità di calcolo di queste macchine, fra i quali, nei par. 6 e 7, l'esistenza di una macchina universale e, nel par. 8, l'insolubilità del problema della fermata. Dopo aver concluso questa prima parte tecnica, nel par. 9, e precisamente nella parte denominata "I. [Type (a)]", Turing passa a un'analisi dettagliata del *tipo* di operazioni che un essere umano compie quando esegue un calcolo arbitrario; sulla base di tale analisi, egli giunge infine a sostenere che, a meno di idealizzazioni o semplificazioni inessenziali, possiamo

sempre costruire un'opportuna macchina (di Turing) che esegue essenzialmente le stesse operazioni di calcolo eseguite dall'essere umano. La tesi così sostenuta, che proponiamo di chiamare *Tesi di Turing propriamente detta (TT)*, può quindi essere formulata come segue:

TT Le macchine di Turing costituiscono un modello adeguato delle attività di calcolo di un essere umano.

Ciò, come abbiamo visto, è da intendersi nel senso forte che la procedura meccanica eseguita da un essere umano impegnato in un'attività di calcolo è, a meno di idealizzazioni o semplificazioni inessenziali, sostanzialmente *identica* a quella eseguita da una macchina di Turing opportunamente scelta.⁸

Il saggio del 1937 si conclude con un'appendice nella quale Turing dimostra l'equivalenza fra il suo concetto di computabilità e la lambda-definibilità di Church.⁹ Il punto che ci interessa sottolineare è che questo risultato, in congiunzione con la tesi di Turing *TT*, permette di *dedurre* la tesi di Church *TC*. Questa inferenza, detta anche *argomento analogico*, è ancora oggi considerata la più convincente giustificazione di *TC*. In vista di questo fatto, la parte non banale di *TC* (ovvero l'inclusione della classe delle funzioni numeriche effettivamente calcolabili in quella delle funzioni ricorsive) è usualmente chiamata *tesi di Church-Turing*.¹⁰

Come ha espressamente notato Copeland (2002), la tesi di Church-Turing viene spesso erroneamente identificata con un'asserzione ben diversa che, contrariamente a *TC*, non si riferisce alle funzioni numeriche meccanicamente calcolabili da un *essere umano*, ma piuttosto a quelle calcolabili da una qualsiasi *macchina*. Tale tesi, detta *Tesi Meccanica (TM)*, non è in realtà attribuibile né a Church né a Turing, ma invece, secondo Odifreddi (1989), a Kreisel 1965. Gandy (1980) è uno dei pochi che tracci una netta distinzione fra tesi di Church-Turing e tesi meccanica. Seguendo Copeland 2002, la tesi meccanica può essere così espressa:

TM Le funzioni numeriche calcolabili da una qualunque macchina (che operi su dati finiti e secondo un programma finito di istruzioni) sono tutte funzioni ricorsive.

Copeland distingue fra due diverse interpretazioni della tesi *TM*; secondo la prima, con il termine "macchina" si intende un apparato reale; la seconda, invece, si riferisce a un apparato astratto o ideale. Se assumiamo la prima interpretazione, la verità o falsità di *TM* diviene una questione di tipo empirico, per la quale ancora non abbiamo una risposta definitiva. Se invece assumiamo la seconda interpretazione, *TM* risulta ovviamente falsa, perché non è difficile descrivere macchine ideali capaci di calcolare funzioni non ricorsive.¹¹

E' però naturale domandarsi se l'ovvia falsità dell'interpretazione ideale di *TM* non dipenda dal fatto che non sia stata posta alcuna restrizione sul *tipo* di macchina ideale da considerare. In effetti, visto che si tratta di una tesi che riguarda la computabilità mediante macchine o apparati ideali, sembra ovvio che, almeno in prima approssimazione, dovremmo limitarci a considerare dispositivi del tipo di quelli studiati dalla teoria standard, o elementare, della computazione. Giunti (1992, 1995, 1996, 1997, 1998, 2006) chiama questi dispositivi *sistemi computazionali*; esempi paradigmatici di tali sistemi sono gli automi finiti, le macchine di Turing, le macchine a

registri e gli automi cellulari. Molti altri esempi possono essere trovati in Minsky 1967 e Wolfram 2002. Determinismo e discretezza sono due importanti proprietà condivise da tutti questi apparati; si noti perciò che i cosiddetti calcolatori analogici, essendo sistemi continui, non rientrano in questa accezione del termine “sistema computazionale”. Infine, dal punto di vista intensionale, i sistemi computazionali sono identificabili con tutti quei sistemi dinamici deterministici discreti che possono essere rappresentati o descritti in modo effettivo.¹²

Si noti che il requisito intuitivo della *rappresentabilità effettiva del sistema* esclude comunque dal novero dei sistemi computazionali tutti quegli ipercomputer¹³ che, in modo più o meno ovvio, includono come parti costitutive dispositivi che vanno chiaramente al di là del limite dell’effettivamente calcolabile. Un esempio tipico di congegno ovviamente non effettivo è un oracolo, con cui può essere modificata una macchina di Turing ordinaria. Come ben noto, le macchine di Turing con oracolo possono calcolare funzioni non ricorsive (si veda la nota 11); ma, proprio per il modo in cui tale risultato è ottenuto, questo senso del termine “calcolare” non dovrebbe essere preso troppo sul serio. Un altro esempio paradigmatico di sistema non effettivamente rappresentabile è un automa cellulare *attualmente* infinito, cioè un automa cellulare che ammetta configurazioni in cui un numero infinito di celle è in uno stato non-quiescente; conseguentemente, solo gli automi cellulari *potenzialmente* infiniti (ovvero, le cui configurazioni ammettono al più un numero finito di celle non quiescenti) sono da ritenersi sistemi computazionali.¹⁴

Se adesso consideriamo nuovamente l’interpretazione ideale di *TM*, ma ne limitiamo il campo di applicazione ai sistemi computazionali, otteniamo un’ulteriore versione della tesi di Church-Turing, che proponiamo di chiamare *Tesi Sistemica (TS)* o anche *tesi matematica*:

TS Le funzioni numeriche calcolabili da un qualunque sistema computazionale (nel senso della caratterizzazione intuitiva data sopra) sono tutte funzioni ricorsive.

A differenza dell’interpretazione ideale non ristretta di *TM*, *TS* non è ovviamente falsa, perché tutti i sistemi studiati finora dalla teoria della computazione standard calcolano soltanto funzioni ricorsive; d’altra parte, però, non sappiamo neanche se *TS* sia vera; infatti, nonostante l’evidenza attuale a suo favore, potremmo tuttavia scoprire qualche sistema dinamico discreto che (i) ammetta una rappresentazione effettiva in un senso chiaro e non controverso (e quindi sia un sistema computazionale) ma che, ciò nonostante, (ii) sia capace di calcolare funzioni non-ricorsive. In tal caso, avremmo trovato un controesempio per *TS*, che risulterebbe perciò falsa.

A questo proposito, bisogna anche ricordare che Gandy (1980) ha dimostrato che, data una definizione molto generale di macchina, tutte le funzioni calcolabili mediante tali macchine sono ricorsive. Non è però affatto chiaro che le macchine di Gandy esauriscano l’estensione dei sistemi computazionali in senso intuitivo, perché gli argomenti a tale riguardo sembrano piuttosto artificiosi. Possiamo quindi affermare che, per quanto concerne lo status di *TS*, siamo oggi più o meno nella stessa condizione in cui si trovava la tesi di Church *TC* prima dell’intervento decisivo di Turing.

Tenendo ben presenti le quattro versioni qui considerate della tesi di Church-Turing, siamo adesso in grado di ritornare al problema che avevamo posto alla fine del paragrafo precedente. La questione che vogliamo affrontare, le cui implicazioni per la

tesi computazionale connessionista *TCCM* sono immediate, è la seguente. Ha senso affermare che l'attività di un sistema connessionista è un'attività di calcolo? O, in altri termini, ha senso descrivere l'attività di una rete neurale come una *computazione*? Le implicazioni per *TCCM* sono chiare: solo se la risposta a questa domanda è affermativa possiamo consistentemente assumere tale tesi, perché essa in effetti implica il carattere computazionale dell'attività di una rete neurale. Se, viceversa, la risposta dovesse essere negativa, si aprirebero scenari diversi, a seconda che si volesse abbandonare o mantenere l'analogia fra cervello/mente da un lato e sistemi connessionisti dall'altro. Nel primo caso, anche *TCCM* dovrebbe essere abbandonata. Nel secondo, invece, sarebbe necessaria un'opportuna revisione di tale tesi; indicheremo infine due possibili direzioni in cui essa potrebbe essere portata avanti.

Notiamo prima di tutto che sia la formulazione classica *TCM* sia quella connessionista *TCCM* della tesi computazionale della mente fanno riferimento ad attività di calcolo, o computazioni, eseguite da *sistemi di un certo tipo*. Ciò è evidente per quanto riguarda *TCCM*, in cui il tipo di sistema a cui vengono riferite le computazioni è quello delle *reti neurali*. Per quanto riguarda invece *TCM*, tenendo presente quanto detto nel par. 4 riguardo all'analogia fra cervello/mente e calcolatore digitale, è chiaro che il tipo di sistema a cui si fa riferimento è quello dei *processori simbolici* dell'approccio classico di Newell, Simon e Pylyshyn.¹⁵ In estrema sintesi, un processore simbolico può essere descritto come un qualunque sistema che operi trasformazioni effettive di strutture simboliche in base a regole formali esplicite; caratteristica fondamentale delle strutture simboliche è quella di costituire rappresentazioni di eventi o situazioni. Per mettere meglio in evidenza il riferimento ai processori simbolici, possiamo così riformulare *TCM*:

*TCM** Tutto il pensiero umano è riconducibile ad attività di calcolo del tipo di quelle condotte da un processore simbolico.

Consideriamo adesso le due formulazioni della tesi computazionale della mente, classica *TCM** e connessionista *TCCM*, e domandiamoci se il *tipo di sistema* a cui esse, rispettivamente, fanno riferimento sia o no incluso nella classe dei *sistemi computazionali* a cui fa invece riferimento la tesi sistemica di Church-Turing *TS*.

Il senso di questa domanda dovrebbe essere ormai piuttosto chiaro. Abbiamo visto che, in base alla tesi di Turing *TT* e alla conseguente giustificazione della tesi di Church *TC*, il concetto di *computazione umana* può oggi essere considerato acquisito. Ma non altrettanto può dirsi per quanto riguarda il concetto di *computazione mediante macchine*. Abbiamo visto infatti che, se tentiamo di estendere tale concetto al di là del campo dei sistemi computazionali, l'idea stessa di calcolo sembra perdere gran parte del suo contenuto caratteristico; un chiaro indizio di ciò è la *banale* falsità dell'interpretazione ideale non ristretta della tesi meccanica *TM*. Se invece ci limitiamo ai sistemi computazionali, non corriamo il rischio di banalizzare la nozione di calcolo mediante macchine; tuttavia, non essendoci ancora un'esplicazione formale condivisa dello stesso concetto di sistema computazionale, non possiamo considerare completamente acquisita neanche la nozione di calcolo ristretta a tali sistemi; indizio di ciò è il fatto che ancora manchi un argomento sufficientemente forte a favore della tesi sistemica *TS*.

Data questa situazione, possiamo comunque affermare che la nozione di computazione mediante macchine ha oggi un senso sufficientemente definito *solo se* riferita a sistemi computazionali. In mancanza di un'adeguata generalizzazione della

teoria standard della computazione, ogni tentativo di estendere acriticamente tale nozione oltre il limite dei sistemi computazionali corre il serio rischio di renderla una vacua metafora.

Notiamo adesso che, per quanto riguarda *TCM**, i processori simbolici sono certamente un tipo speciale di sistemi computazionali. Ma, per quanto riguarda *TCCM*, soltanto alcuni, ma non certamente tutti i sistemi connessionisti sono computazionali. Infatti, come gli stessi Churchland espressamente riconoscono, molti sistemi connessionisti sono *continui*, sia per quanto riguarda l'evoluzione temporale, sia per quanto riguarda i possibili valori di attivazione di ciascuna unità. Inoltre, dato ciò che sappiamo dei neuroni biologici, è ipotizzabile che i modelli che meglio descriveranno le reti neurali cerebrali saranno proprio di tipo continuo. Ma abbiamo visto che, se un sistema è continuo, non è un sistema computazionale. Ne segue quindi che la tesi connessionista *computazionale* della mente *TCCM* non ha un senso sufficientemente definito, a meno che non la si limiti esclusivamente a reti neurali *discrete*.

6. Conclusioni

Sulla base dell'analisi fin qui svolta, ci sentiamo di affermare che il tentativo dei Churchland di salvare la tesi computazionale della mente semplicemente *riformulandola* in termini di *calcolo connessionista* ha ben scarse prospettive di successo. D'altra parte, però, l'abbandono dell'approccio connessionista sembra del tutto fuori luogo. Infatti, da un lato, i modelli connessionisti si sono dimostrati estremamente utili nella simulazione di fenomeni cognitivi e, dall'altro, essi sembrano comunque piuttosto promettenti anche per la spiegazione dei reali processi cerebrali che stanno alla base del nostro pensiero. Di fronte a questa situazione, si aprono allora almeno due possibilità.

La prima consiste nel mantenere invariata la formulazione di *TCCM*, dando però un senso preciso al concetto di calcolo connessionista attraverso un'adeguata generalizzazione della teoria standard della computazione ai sistemi continui. La seconda, invece, consiste nel riformulare la tesi connessionista della mente lasciando cadere il *computazionalismo* da essa implicato, e sostituendolo con un'ipotesi metodologica alternativa che si adatti meglio alle caratteristiche specifiche delle reti neurali; tale nuova ipotesi è il *dinamicismo*.

Ovviamente, non è questa la sede neanche per tentare una rassegna delle ricerche che oggi perseguono la prima alternativa. Ci limiteremo perciò soltanto a formulare alcune condizioni che un'adeguata generalizzazione della teoria standard della computazione dovrebbe presumibilmente soddisfare. Sembra infatti ragionevole richiedere che una tale teoria (i) si applichi a un'ampia classe di sistemi continui che intersechi quella dei sistemi connessionisti, e anche a tutti e soli quei sistemi discreti che sono sistemi computazionali nel senso standard; (ii) nel caso speciale dei sistemi computazionali, la teoria più generale si riduca a quella standard, e quindi (iii) tutti i risultati della teoria standard della computazione risultino casi speciali della teoria più generale. Non possiamo affrontare qui il problema di stabilire se queste condizioni siano davvero ben poste, o se siano infatti già soddisfatte, in tutto o in parte, da alcuni lavori che si propongono di generalizzare vari aspetti della teoria standard della computazione (MacLennan 2001, 1994c, 1994b, 1994a; Blum, Shub e Smale 1989; Shepherdson 1988, 1985, 1975; Friedman 1971; Montague 1962).

Il *computazionalismo*, nella sua forma più generale, può essere caratterizzato come un'ipotesi metodologica trasversale a diversi approcci della scienza cognitiva e, in particolare, a quello simbolico e a quello connessionista (Giunti 1996, 1997, 1998). Secondo tale ipotesi, i fenomeni cognitivi possono essere adeguatamente spiegati analizzando le *computazioni* condotte da opportuni modelli dei fenomeni stessi. Il computazionalismo è dunque una prescrizione di un particolare *stile di spiegazione* dei fenomeni cognitivi, basato sull'uso di concetti tratti dalla teoria standard della computazione. Fra essi, il concetto centrale è, appunto, quello di computazione. Per il computazionalismo, spiegare un fenomeno cognitivo *FC* implica infatti (1) la costruzione di un opportuno modello *M* di *FC* e (2) l'analisi di *M* dal punto di vista delle *computazioni* che esso esegue. Si noti che ciò *presuppone* che il modello *M* sia un sistema computazionale, ovvero, cada all'interno del dominio di applicazione della teoria standard della computazione. Infatti, abbiamo visto che soltanto per questo tipo di sistema la nozione di computazione ha un senso preciso, definito dalla teoria stessa.

E' perciò chiaro che la tesi computazionale connessionista della mente *TCCM* può in realtà essere interpretata come la congiunzione di due ipotesi metodologiche distinte. Da un lato, un'ipotesi che prescrive il *tipo di modello* che dovrebbe risultare adeguato per la descrizione dei fenomeni cognitivi; tale tipo è quello delle reti neurali. Dall'altro, un'ipotesi che prescrive *lo stile di spiegazione* di questi fenomeni; tale seconda ipotesi è, appunto, il computazionalismo. Ma allora, se siamo in grado di *sostituire* il computazionalismo con un'ipotesi metodologica alternativa, possiamo mantenere la prima ipotesi e arrivare così a una nuova formulazione della tesi connessionista. L'ipotesi metodologica alternativa che, secondo Smolensky (1988), è più adatta a cogliere i processi tipici delle reti connessioniste, è il dinamicismo.

Analogamente al computazionalismo, anche il dinamicismo prescrive un particolare *stile di spiegazione* dei fenomeni cognitivi (Giunti 1995, 1996, 1998). Tuttavia, mentre per il computazionalismo tali spiegazioni devono utilizzare concetti tratti dalla teoria standard della computazione, per il dinamicismo la *teoria* matematica di riferimento è quella *dei sistemi dinamici*. In questa prospettiva, il concetto centrale nell'analisi dei modelli è quello di evoluzione dinamica. Spazio degli stati, orbita, attrattore, biforcazione, ecc. sono altri tipici concetti utilizzati nelle spiegazioni di tipo dinamico. In modo simile al computazionalismo, anche il dinamicismo presuppone che i modelli impiegati cadano nel dominio di applicazione della propria teoria di riferimento (in questo caso, la teoria dei sistemi dinamici), perché solo per tali sistemi i concetti menzionati sopra hanno un senso ben preciso, definito dalla teoria stessa. Come Smolensky (1988) ha chiarito, i modelli connessionisti, essendo sistemi dinamici, supportano in modo naturale spiegazioni di questo tipo.

Possiamo infine notare che il dinamicismo è in realtà un'ipotesi metodologica molto generale che è in linea di principio compatibile anche con l'approccio simbolico alla cognizione (Giunti 1995, 1997), come del resto con ogni altro approccio che utilizzi modelli di tipo dinamico.¹⁶ Inoltre, le due possibilità che abbiamo qui prospettato per una possibile revisione della tesi connessionista non sono incompatibili, ma possono in effetti sostenersi l'una con l'altra. Infatti, un seguace di *TCCM* può, da un lato, tentare di dare un senso preciso all'interpretazione computazionale del connessionismo e, nel frattempo, utilizzare la teoria dei sistemi dinamici per render conto del comportamento dei propri modelli. E' proprio questa la strada che oggi sembra essere seguita da molti autorevoli esponenti dell'approccio connessionista.

Riferimenti bibliografici

- Block, Ned (1981), "Psychologism and behaviorism", *Philosophical Review*, 90:5-43.
- Blum, Lenore, Mike Shub e Stephen Smale (1989), "On a theory of computation and complexity over the real numbers: NPCompleteness, recursive functions and universal machines", *Bulletin of the American Mathematical Society* 21, 1:146.
- Copeland, B. Jack (2002), "The Church-Turing thesis", in Edward N. Zalta (a cura di), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy (Fall 2002 Edition)*. URL = <<http://plato.stanford.edu/archives/fall2002/entries/church-turing/>>
- Corradini, Flavio, Stefano Leonesi, Stefano Mancini e Carlo Toffalori (2005), *Teoria della computabilità e della complessità*, Milano: McGraw-Hill.
- Church, Alonso (1932), "A set of postulates for the foundation of logic", *Annals of Mathematics*, second series 33:346-366.
- (1936a), "An Unsolvable problem of elementary number theory", *American Journal of Mathematics* 58:345-363.
- (1936b), "A note on the Entscheidungsproblem", *Journal of Symbolic Logic* 1:40-41.
- Churchland, Paul M. (1995), *The engine of reason, the seat of the soul*, Cambridge, MA: The MIT Press.
- Churchland, Paul M. e Patricia Smith Churchland (1990), "Could a machine think?", *Scientific American* 262, 1:32-37. Trad. it. "Può una macchina pensare?", *Le Scienze* 259, marzo 1990:22-27.
- Dalla Chiara, Maria Luisa, Roberto Giuntini e Francesco Paoli (2004), *Sperimentare la logica*, Napoli: Liguori Editore.
- Davis, Martin (1958), *Computability and unsolvability*, New York: McGraw-Hill.
- French, Robert M. (1990), "Subcognition and the limits of the Turing test", *Mind* 99:53-65.
- Friedman, Harvey (1971), "Algorithmic procedures, generalized Turing algorithms, and elementary recursion theory", in Gandy, Robin O., e C. M. E. Yates (a cura di), *Logic colloquium '69*, Amsterdam: North Holland, 361-389.
- Herbrand, Jacques (1932), "Sur la non-contradiction de l'arithmétique", *Journal für die reine und angewandte Mathematik* 166:1-8.
- Hilbert, David e Wilhelm Ackermann (1928), *Grundzüge der Theoretischen Logik*, Berlin: Springer. Trad. inglese della II edizione tedesca del 1938: Hilbert, David e Wilhelm Ackermann (1999), *Principles of mathematical logic*, a cura di Robert E. Luce, Providence, RI: AMS Chelsea.
- Gandy, Robin (1980), "Church's thesis and principles for mechanism", in Barwise, Jon, H. Jerome Keisler and Kenneth Kunen (a cura di), *The Kleene symposium*, Amsterdam: North Holland Publishing Company, 123-148.
- Giunti, Marco (1992), *Computers, dynamical systems, phenomena and the mind*, Ph.D. dissertation, Bloomington, IN: Indiana University.
- (1995), "Dynamical models of cognition", in *Mind as motion: Explorations in the dynamics of cognition*. Si veda Port e van Gelder (1995), 549-571.
- (1996), "Beyond computationalism", in Cottrel, Garrison W. (a cura di), *Proceedings of the 18th annual conference of the Cognitive Science Society*, Mahwah, NJ: L. Erlbaum Associates, 71-75.

- (1997), *Computation, dynamics, and cognition*, New York: Oxford University Press.
- (1998), “Is computationalism the hard core of cognitive science?”, in Abrusci, Vito M., Carlo Cellucci, Roberto Cordeschi e Vincenzo Fano (a cura di), *Prospettive della logica e della filosofia della scienza: Atti del convegno triennale della Società Italiana di Logica e Filosofia delle Scienze, Roma, 3-5 gennaio 1996*, Pisa: Edizioni ETS, 255-267.
- (2005), “Dal simulazionismo al paradigma Galileiano”, in *Atti del XIX Congresso Nazionale dell'Associazione Italiana di Psicologia, sez. di Psicologia Sperimentale, Cagliari, 18-20 settembre 2005*, Cagliari: AIP.
- (2006), “Is being computational an intrinsic property of a dynamical system?”, in Minati, Gianfranco, Eliano Pessa e Mario Abram (a cura di), *Systemics of Emergence: Research and Development*, Berlin: Springer, 683-694.
- Gödel, Kurt (1934), “On undecidable propositions of formal mathematical systems”, lecture notes taken by Kleene and Rosser at the Institute for Advanced Study, in Davis, Martin (a cura di) (1965), *The Undecidable*, Hewlett, NY: Raven Press.
- Kleene, Stephen Cole (1935), “A theory of positive integers in formal logic”, *American Journal of Mathematics* 57:153-173, 219-244.
- Kreisel, Georg (1965), “Mathematical logic”, in Saaty, Thomas L. (a cura di), *Lectures on modern mathematics*, vol. III, New York: Wiley, 95-195.
- Lolli, Gabriele (1994), “Introduzione”, in *Intelligenza meccanica*. Si veda Turing 1994, 7-23.
- Lycan, William G. (a cura di) (1990), *Mind and cognition: A reader*, Oxford, UK: Blackwell.
- MacLennan, Bruce (1994a), “Continuous symbol systems: The logic of connectionism”, in Levine, Daniel S. e Manuel Aparicio IV (a cura di), *Neural networks for knowledge representation and inference*, Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum, 83-120.
- (1994b), “Image and symbol: Continuous computation and the emergence of the discrete”, in Honavar, Vasant and Leonard Uhr (a cura di), *Artificial intelligence and neural networks: Steps toward principled integration*, New York, NY: Academic Press, 207-240.
- (1994c), “Words lie in our way”, *Minds and Machines* 4, 4: 421-437.
- (2001), “Transcending Turing computability”, University of Tennessee, Knoxville, *Department of Computer Science Technical Report*, UT-CS-01-473.
- Minsky, Marvin (1967), *Computation: Finite and infinite machines*, Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.
- Montague, Richard (1962), “Toward a general theory of computability”, in Kazemier, B. e D. Vuysje (a cura di), *Logic and language*, Dordrecht: D. Reidel Publishing.
- Newell, Allen (1980), “Physical symbol systems”, *Cognitive Science* 4:135-183.
- Newell, Allen e Herbert Simon (1972), *Human problem solving*, Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.
- Odifreddi, Piergiorgio (1989), *Classical recursion theory*, vol. I, Amsterdam: North Holland.
- Putnam, Hilary (1960), “Minds and machines”, in Hook, Sidney (a cura di), *Dimensions of mind*, New York: New York University Press, 148-179. Trad. it. “Menti e macchine”, in *Mente linguaggio e realtà*. Si veda Putnam 1987, 392-416.

- (1964), “Robots: machines or artificially created life?”, *Journal of Philosophy* LXI, 21:688-691. Trad. it. “I robot: macchine o vita creata artificialmente?”, in *Mente linguaggio e realtà*. Si veda Putnam 1987, 416-439.
- (1965), “Brains and Behavior”, in Butler, R. J. (a cura di), *Analytical philosophy*, second series, Oxford: Basil Blackwell, 211-235. Trad. it. “Cervelli e comportamento”, in *Mente linguaggio e realtà*. Si veda Putnam 1987, 354-372.
- (1967a), “The mental life of some machines”, In Castañeda, Hector-Neri (a cura di), *Intentionality, minds, and perception*, Wayne State University Press, 177-200.
- (1967b), “Psychological Predicates”, in Capitan, W. H. e D. D. Merrill (a cura di), *Art, mind, and religion*, Pittsburgh: University of Pittsburgh Press, 37-48. Ristampato col titolo “The nature of mental states”, in Rosenthal (a cura di) 1987, 150-161. Con lo stesso titolo in Lycan (a cura di) 1990, 47-56.
- (1987), *Mente linguaggio e realtà*, Milano: Adelphi.
- Pylyshyn, Zenon W. (1984), *Computation and cognition*, Cambridge, MA: The MIT Press.
- Port, Robert F. e Timothy J. van Gelder (a cura di) (1995), *Mind as motion: Explorations in the dynamics of cognition*, Cambridge: The MIT Press.
- Rosenthal, David M. (a cura di) (1987), *Materialism and the mind-body problem*, Indianapolis: Hackett Publishing Company, Inc.
- Rumelhart, David E. e James L. McClelland (a cura di) (1986), *Parallel distributed processing*, 2 voll., Cambridge, MA: The MIT Press.
- Searle, John R. (1980), “Minds, brains and programs”, *Behavioral and Brain Sciences*, 3:417-457. Trad. it. “Menti, cervelli e programmi”, in Searle, John R. (1984), *Menti, cervelli e programmi. Un dibattito sull'intelligenza artificiale*, a cura di G. Tonfoni, Milano: Clup-Clued, 45-72.
- (1990), “Is the brain’s mind a computer program?”, *Scientific American* 262, 1:26-31. Trad. it. “La mente è un programma?”, *Le Scienze* 259, marzo 1990:16-21.
- Shepherdson, John C. (1975), “Computation over abstract structures: Serial and parallel procedures and Friedman's effective definitional schemes”, in Rose, H. E., and John C. Shepherdson (a cura di), *Logic colloquium '73*, Amsterdam: North Holland, 445-513.
- (1985), “Algorithmic procedures, generalized Turing algorithms, and elementary recursion theory”, in Harrington, L. A. e al. (a cura di), *Harvey Friedman's research on the foundations of mathematics*, Amsterdam: North Holland, 285-308.
- (1988), “Mechanisms for computing over abstract structures”, in Herken, Rolf (a cura di), *The universal Turing machine: A half century survey*. Oxford: Oxford University Press, 581-601.
- Shieber, Stuart (a cura di) (2004), *The Turing test*, Cambridge, MA: The MIT Press.
- Smith Churchland, Patricia (1986), *Neurophilosophy: Toward a unified science of the mind-brain*, Cambridge, MA: 1986.
- Smith, Linda B. e Esther Thelen (a cura di) (1993), *A dynamic systems approach to development*, Vambridge, MA: The MIT Press.
- Smolensky, Paul (1988), “On the proper treatment of connectionism”, *Behavioral and Brain Sciences* 11:1-74.
- Thelen, Esther e Linda B. Smith (1994), *A dynamic systems approach to the development of cognition and action*, Cambridge, MA: The MIT Press.

- Tschacher, Wolfgang e Jean-Pierre Dauwalder (a cura di) (2003), *The dynamical systems approach to cognition*, Singapore: World Scientific.
- Turing, Alan M. (1950), "Computing machinery and intelligence", *Mind* 59:433-460. Trad. it. "Macchine calcolatrici e intelligenza", in *Intelligenza meccanica*. Si veda Turing 1994, 121-157.
- (1937), "On computable numbers, with an application to the Entscheidungsproblem", *Proceedings of the London Mathematical Society* ser. 2, 42:230-265.
- (1994), *Intelligenza meccanica*, a cura di Gabriele Lolli, Torino: Bollati Boringhieri.
- van Gelder, Timothy J. (1998), "The dynamical hypothesis in cognitive science", *Behavioral and Brain Sciences* 21: 615-665.
- Ward, Lawrence M. (2002), *Dynamical cognitive science*, Cambridge, MA: The MIT Press.
- Wolfram, Stephen (2002), *A new kind of science*, Champaign, IL: Wolfram Media, Inc.

¹ Gabriele Lolli (1994, 18) sostiene che, per Turing, il gioco dell'imitazione non è necessario e, forse, neanche sufficiente per l'attribuzione di intelligenza. Anche se Turing (1950) non afferma mai esplicitamente la sufficienza del gioco, che egli la dia quasi per scontata appare evidente da una lettura complessiva del saggio stesso, nonché da molti passi specifici la cui interpretazione più naturale si ottiene proprio presupponendo tale affermazione; si veda, per esempio, la risposta all'obiezione dell'autocoscienza di Jefferson.

Lolli (1994, 18) sostiene anche che in Turing 1950 non viene proposto alcun criterio preciso per il superamento del test. Sebbene l'affermazione di Lolli sia letteralmente vera, essa non tiene conto del passo in cui Turing domanda se possa esistere una macchina capace di ingannare l'interrogante altrettanto spesso di quando gli interlocutori siano ambedue esseri umani. Questo passo e altri dello stesso saggio (per es. la "previsione del 70%" all'inizio del paragrafo intitolato *Opinioni contrarie a proposito dell'argomento principale*) suggeriscono in modo piuttosto evidente che il test debba ritenersi superato quando una macchina sia in grado di ingannare un interrogante circa il 50% delle volte (in un test senza limitazioni né di contenuto né di tempo). Tale risultato, infatti, è quello atteso nel caso in cui i due interlocutori X e Y siano ambedue esseri umani. In tal caso, la risposta dell'interrogante ("X macchina e Y uomo", o viceversa) sarebbe casuale e quindi, ripetendo il test un numero sufficiente di volte, la percentuale di risposte errate dovrebbe approssimare il 50%.

² Dal 1990 Hugh Loebner ha messo a disposizione un sostanzioso premio e una medaglia d'oro per il primo programma che riuscirà a passare una prova ispirata al Turing test. La prova si svolge annualmente, ma ancora nessun programma è riuscito ad aggiudicarsi il premio. Per maggiori dettagli si veda la home page del Loebner Prize, all'indirizzo <<http://www.loebner.net/Prize/loebner-prize.html>>.

³ Si veda l'inizio dell'ultimo paragrafo del saggio del 1950, intitolato *Macchine che apprendono*.

⁴ La tesi *TCM* costituisce il nucleo del *funzionalismo computazionale*, posizione che può essere fatta risalire a diversi scritti di Hilary Putnam (1960, 1964, 1965, 1967a, 1967b) a partire dai primi anni '60.

⁵ Al contrario, per quanto riguarda la sufficienza del test di Turing, French 1990 la sottoscrive esplicitamente.

⁶ Tuttavia, alcune assunzioni dell'argomento stesso (quali per esempio la finitezza del numero delle conversazioni sensate) non sono così innocenti come appaiono a prima vista e potrebbero perciò indebolirne la forza.

⁷ Questa, con un'unica differenza, è la caratterizzazione di procedura meccanica data da Copeland (2002). L'unica differenza è che Copeland richiede anche che una procedura meccanica "M, se eseguita senza errore, produca il risultato desiderato in un numero finito di passi". Questo requisito non è essenziale per una corretta caratterizzazione generale di una procedura meccanica e, anzi, la rende troppo restrittiva. Imponendo questa condizione, infatti, qualunque programma che non termini per qualche input risulterebbe escluso dal novero delle procedure meccaniche. A questo proposito, si veda anche Corradini, Leonesi, Mancini e Toffalori (2005, par. 1.3).

-
- ⁸ La procedura meccanica eseguita da una macchina di Turing può essere identificata con l'insieme delle quintuple (istruzioni) della macchina stessa. Infatti, in base alla caratterizzazione di procedura meccanica data nel testo, tale insieme risulta ovviamente una procedura meccanica.
- ⁹ Per la precisione, Turing non dimostra l'identità fra la classe delle *funzioni* numeriche Turing-computabili e quella delle funzioni lambda-definibili, ma dimostra invece l'identità fra le *successioni* (*sequences*) numeriche Turing-computabili e lambda-definibili. La dimostrazione di Turing può però essere facilmente modificata per ottenere anche il risultato relativo alle funzioni.
- ¹⁰ Gandy la chiama "teorema T" (Gandy 1980, 124) e sostiene che Turing dette forti argomenti a suo favore in base alla sua analisi dell'attività di calcolo di un essere umano (Gandy 1980, 123). Copeland (2002) propone di chiamarla "tesi di Church-Turing propriamente detta", per distinguerla da altre formulazioni della tesi stessa, in realtà non direttamente riconducibili né a Church né a Turing, fra le quali la cosiddetta "tesi meccanica" (al proposito, si veda sotto nel testo).
- ¹¹ Per esempio, si può modificare una macchina di Turing ordinaria aggiungendo un cosiddetto *oracolo*, che viene interrogato tutte le volte che la macchina si trova in stato q_i e legge simbolo S_j . Per ipotesi, l'oracolo è capace di rispondere correttamente alla seguente domanda: il numero di "1" che si trova attualmente sul nastro appartiene o no a un certo sottoinsieme fissato X dei numeri interi non negativi? A seconda della risposta dell'oracolo, poi, la macchina riprende la computazione, andando in uno dei due stati q_{si} o q_{no} . È facile dimostrare che, se la funzione caratteristica di X non è ricorsiva, le macchine di Turing con oracolo possono calcolare funzioni non ricorsive. Davis (1958, cap. 1, par. 4) ha sviluppato su questa base la teoria delle funzioni relativamente computabili.
- ¹² Giunti (1992, 1997) ha proposto un'esplicazione formale di questa nozione intuitiva di sistema computazionale. Una definizione formale alternativa, che parte da presupposti alquanto diversi, è quella di Gandy (1980). Al momento non sappiamo se le due definizioni individuino esattamente la stessa classe di sistemi.
- ¹³ Per maggiori dettagli sugli ipercomputer si veda MacLennan 2001.
- ¹⁴ Per un'estesa trattazione degli automi cellulari si veda Wolfram 2002.
- ¹⁵ Per l'approccio simbolico classico alla cognizione si veda Newell e Simon 1972, Newell 1980, Pylyshyn 1984. Giunti (1995, 1996, 1997, 1998, 2005) analizza i presupposti metodologici dell'approccio classico e di altri approcci alla cognizione, fra cui quelli connessionista e dinamico.
- ¹⁶ Per l'approccio dinamico si veda Smith e Thelen 1993, Thelen e Smith 1994, Port e van Gelder 1995, van Gelder 1998, Ward 2002, Tschacher e Dauwalder 2003.