

Turing, un romanzo

Gabriele Lolli

This is a book about love - and about the
unique act of love that we call teaching.

Christos H. Papadimitriou

Un nuovo libro nel settore della divulgazione, questa volta soprattutto informatica, se la si può separare dalla matematica, merita di essere segnalato.

A parte il suo contenuto, il libro stesso è un contributo alla discussione su come può essere svolta la divulgazione informatica. Nell'informatica, oltre alla scrittura di programmi e alla gestione delle macchine, esiste anche una teoria, e vi si accompagna una visione delle trasformazioni culturali, scientifiche e psicologiche indotte dal fenomeno del computer e della rete. Parlarne e coinvolgere ricercatori e utenti è una necessità e un servizio.

Questi aspetti sono spiegati in maniera eccezionale in un libro di Christos H. Papadimitriou, *Turing. A Novel about Computation*, The Mit Press, Cambridge Mass., 2003, pp. 284). Donald Knuth lo ha presentato affermando che *Turing* stabilisce nuovi standard per l'esposizione divulgativa della *computer science*, ma si potrebbe dire della scienza in generale.

Papadimitriou è un notevole studioso e autore di ottimi manuali, quali *Elements of the Theory of Computation* (con Harry Lewis) e *Computational Complexity*, e dimostra di essere anche promettente scrittore; la sua scrittura è localmente elegante e incisiva, anche se globalmente (nella struttura del racconto) forse ancora acerba.

Il libro è un romanzo, come vuole il titolo, o una novella, nella quale si alternano vari registri: quello fantascientifico (nella descrizione ad esempio dell'amore virtuale fatto attraverso l'elmetto che permette anche di assumere personalità diverse, e ricorda il *merging* dei corpi nel *Wetware* di R. Rucker); quello del thriller storico-scientifico; quello dell'amore (umano ma anche, trapela in continuazione, per la sua terra e la sua grande eredità culturale).

Con un artificio narrativo, non sempre ben coordinato con la vicenda, interviene ripetutamente il programma educativo (*tutoring*) interattivo TURING (da Tu-to-ring?) che parlando con la voce e la personalità del vero Turing espone alcune lezioni sui capitoli più importanti sia dei contributi di Turing sia degli sviluppi storici e attuali dell'informatica (e d'altro, economia, morfogenesi, complessità).

Una divertente appendice riporta gli scambi di un fittizio *newsgroup* dove le integrazioni delle notizie tecniche e storiche si alternano con spiritose polemiche (segnaliamo ad esempio una coppia di *posting* sulla visione alternative della posizione e del ruolo dei Macedoni rispetto alla storia dei Greci, o uno di un offeso inglese orfano dell'impero sul trattamento secondo lui corretto riservato a Turing).

Il servizio migliore che possiamo fare, nell'attesa che il libro venga tradotto, per invogliare a procurarselo, nella speranza che ormai almeno i giovani non sia spaventati dalla lingua inglese, qui facile ed elegante, è quello di riportare qualche passo delle lezioni di TURING, sia pure del tutto insufficienti a dare un'idea della ricchezza degli argomenti trattati (una lista incompleta: paradossi, metalinguaggio, sistemi formali, notazione posizionale, algoritmi, Al-Kwarizmi nella Bagdad del IX secolo, il teorema di Cantor, con la diagonalizzazione, e i diversi infiniti, struttura del calcolatore, Rete, macchine di Turing, teoremi di impossibilità, teoremi di Gödel, morfogenesi e instabilità di Turing, allocazione delle risorse, teoria dell'equilibrio dei prezzi, metodo del simplesso, ponti di Eulero, percorso del cavallo, complessità computazionale, problemi intrattabili, NP-completi, crittografia a chiave pubblica, l'algoritmo RSA e relative battaglie politiche, test di Turing e le varie fasi dell'Intelligenza Artificiale, e forse altri).

Abbiamo preferito scegliere pochi argomenti ma fornendone ampi stralci, per rendere anche l'idea della scrittura. Speriamo di non incorrere in qualche forma di lesso copyright.

Christos H. Papadimitriou

La dimostrazione in matematica

[La Grecia] è stata la prima società in cui le dimostrazioni sarebbero potute essere inventate. Puoi immaginare perché?

Alexandros crede di sapere la risposta. “La democrazia?”

Proprio così. Discorso, dialogo, argomento, dimostrazione. Possono solo fiorire in una società ugualitaria.

Lasciami spiegare. Immagina di essere un giovane studioso nell'Egitto dei Faraoni. Il sommo sacerdote ti ha appena dischiuso un importante e prezioso elemento di informazione: In ogni rettangolo, la somma dei quadrati di due lati consecutivi è uguale al quadrato della diagonale. Si tratta naturalmente di quello che ora noi chiamiamo il teorema di Pitagora; esso era ben noto ai Babilonesi e agli Egiziani almeno mille anni prima di Pitagora.

Bene, adesso tu sei il fortunato custode di questa verità. L'informazione ti è stata data da un uomo dotato di poteri divini, che rispetti e a cui sei legato probabilmente da una lealtà senza confini. Vorresti insultarlo chiedendogli una prova? A parte che, a essere sinceri, questa è di gran lunga la più credibile di tutte le affermazioni che il sacerdote ti ha fatto negli ultimi tempi - voglio dire, confrontala con la sua descrizione dell'inferno, o delle avventure di quella dea con il muso di gatta. Ad ogni modo, l'affermazione corrisponde perfettamente agli esempi che hai controllato, cos'altro vorresti? Penso davvero che cercare una dimostrazione sarebbe l'ultima delle tue priorità. Continueresti a vivere una vita felice e produttiva, a guadagnarti il rispetto della tua comunità dividendo la terra in perfetti lotti rettangolari ogni volta che il Nilo, quel Dio capriccioso e fangoso, decide di esondare. Le dimostrazioni non sono mai emerse a Babilonia o in Egitto.

Ma immagina ora invece di essere un giovane filosofo, un rifugiato politico dalla tua città natale di Samo, che lotti per farti un nome in questa vivace e frenetica città dell'Italia meridionale. Nei tuoi viaggi sei venuto a conoscere un'interessante, bella osservazione sui lati e la diagonale dei rettangoli. Il problema è, come fare a convincere quei sapientoni del mercato che essa è vera? Tu hai tutti i motivi per cercare di persuaderli che le tue idee sono originali e corrette. Ricorda, ti stai costruendo una reputazione, reclutando studenti, creandoti una piccola nicchia intellettuale, in competizione con una dozzina di altri filosofi. Gli intelligenti e inquieti uomini della città hanno tutto il tempo di discutere, controllare, disputare praticamente di ogni cosa, tanto i loro campi e negozi sono gestiti con precisione di orologio dai loro schiavi. Essi non sono disposti a credere alla tua storia sui rettangoli solo perché funziona in alcuni esempi. L'altro giorno, quando hai spiegato loro la tua teoria dei tre livelli dell'anima (l'inferiore che cerca il guadagno, il mediano che cerca l'onore e il più elevato che cerca la sapienza) non sei riuscito a convincerli, ti hanno preso in giro e ti hanno contraddetto con sarcasmi, e sei tornato a casa deluso e depresso.

Ma forse questa volta c'è speranza. Questa nuova proposizione sembra appartenere a una sfera diversa, più elevata, che può probabilmente essere stabilita da un argomento che si basa solo su verità indiscutibili, universalmente accettate. Inventare un tale argomento sarebbe il tipo di scoperta che ti renderebbe famoso, ti porterebbe ammirazione, reputazione, studenti. Il tuo nome diventerebbe immortale. Perché chiunque è in grado di imparare a memoria e applicare il teorema, ma solo uno può essere il primo a dimostrarlo.

Più ci pensi e più diventi eccitato, la tua intuizione si acuisce, i triangoli e i quadrati che disegni nella sabbia diventano vivi. E prima di sapere come, tu tracci le sottili linee che fanno palpitare il cuore, e rendono luminoso il giorno. Hai un'idea, un piano, presto un argomento, una dimostrazione.

Il computer

Ma naturale che posso insegnarti qualcosa sui computer, Alexandros. Se non ne fossi capace, non sarei degno del banale gioco di parole con “tutoring” che il mio nome dovrebbe evocare.

Per cominciare, hai mai pensato a cosa capita davvero quando clicchi sul mouse, o quando batti una lettera sulla tastiera?

“No”. Alexandros non ha mai battuto due caratteri con più esitazione e consapevolezza.

Bene, se premi il tasto *a* sulla tastiera, un *a* appare sullo schermo. Sembra istantaneo no? La verità è che in mezzo accadono un migliaio di piccole cose. Contiamole. Innanzi tutto, la pressione del tasto fa scorrere una corrente elettrica in un piccolo filo dentro alla tastiera. C'è un piccolo processore nella tastiera - un computer ausiliario! - che non fa altro che censire uno dopo l'altro questi fili, migliaia di volte al secondo, all'erta per tasti premuti. Quando sente la corrente nel piccolo filo che viene dal tasto *a*, esso fa due cose: innanzi tutto, dall'identità del filo che porta corrente deduce l'identità del tasto premuto - *a* viene immagazzinato in un posto sicuro, da cui sarà recuperato in seguito. Come seconda azione, esso batte sulla spalla del processore centrale del tuo computer. Vedi, il processore centrale è il membro più rispettato di questa banda - il boss - il suo tempo è prezioso, egli è sempre in attività. Ma quando succede qualcosa di nuovo - come un tasto premuto - egli deve essere avvertito. Da qui il colpetto sulla spalla. Si chiama *interrupt*.

Ora, potresti pensare che la pressione di un tasto non sia un evento così

straordinario; lo fai più volte al secondo quando scrivi. Ma dal punto di vista del boss, si tratta di un diversivo eccitante perchè, vedi, lui fa centinaia di milioni di piccole cose - alla lettera, centinaia di milioni - nell'intervallo tra due tasti premuti.

Dunque, quando il processore si accorge del colpetto sulla spalla, egli lascia quello che stava facendo in quel momento per prendersi cura dell'*interrupt* - ma naturalmente prima salva il suo lavoro in un posto speciale in modo da essere in grado di riprenderlo quando avrà finito con questo compito sopragiunto. Dalla natura di questo *interrupt* (perché il colpetto sulla spalla non era soltanto un colpetto; conteneva alcune informazioni utili), il boss si rende conto che è stato premuto un tasto, e quindi assume le iniziative appropriate: egli esegue un programma (una minuscola parte del sistema operativo del computer) il cui solo scopo è quello di reagire alla pressione dei tasti.

Questo momento rappresenta una transizione importante nel nostro resoconto; siamo entrati nel regno del *software*. Per il prossimo milionesimo di secondo, o giù di lì, il computer fa quello che meglio sa fare - ciò che fa tutto il tempo, se si escludono eventi anomali come un *interrupt* - cioè esegue nel processore centrale un programma, un algoritmo, una sequenza di istruzioni. Questo particolare programma è molto piccolo, alcune dozzine di istruzioni circa, e fa la cosa giusta: va nel posto speciale dove il processore ausiliario ha registrato l'identità del tasto premuto e lo trasmette al monitor - quell'aggeggio che sembra una televisione davanti a te. Oh, deve fare alcune altre cose, come verificare che non sia stato premuto *shift*, guardando in un altro angolo di quel posto speciale, e in tal caso aggiorna l'identità del carattere ad *A* - ma lasciamo perdere. Ora il monitor realizza che è stato premuto *a* e allora orienta il suo fascio di elettroni veloci in modo che certe particelle fluorescenti sulla superficie dello schermo si illuminano a formare un *a*. Nel frattempo il piccolo programma, compiuta la sua missione, termina, si congeda e finalmente il processore centrale, accorgendosi di essere ozioso, riprende il lavoro non terminato che ha messo da parte nel posto speciale - quel posto speciale è chiamato la pila (*stack*), perché si rimuove sempre quello che sta sopra - e ricomincia ad eseguirlo. Meno di un millesimo di secondo è trascorso da quando hai premuto il tasto, per cui sei giustificato a pensare che tutto questo sia avvenuto istantaneamente. Sorprendente, no?

“È molto complicato”, commenta Alexandros, “ma almeno si capisce”. Certo che si capisce. Sai perché? Ho spiegato un evento - il tasto premuto - in termini di una sequenza di eventi al *livello immediatamente inferiore*.

Perché questo è il genio del computer: è di gran lunga il più complicato degli artefatti, ma è disegnato e costruito in modo talmente intelligente - strato su strato - che si ha quasi la sensazione della semplicità. Ma ora puoi prendere ciascuno dei piccoli eventi che abbiamo discusso - ad esempio l'esecuzione di una istruzione nel processore centrale - e accorgerti che esso consiste di mille piccoli passi, e che quei passi possono essere analizzati ulteriormente, e così via.

Ma ora voglio accompagnarti lungo i livelli di questa macchina affascinante, dal basso verso l'alto. Per cominciare, quale credi che sia il livello più basso?

“Elettroni?”, Alexandros azzarda.

Giusto. [Un inciso sui quanti] Dunque elettroni, il nostro livello di base. Noi usiamo gli elettroni per costruire la più importante astrazione nella computazione, il *bit*. Sai cosa è un bit, Alexandros?

“Zero o uno, no?”

Più o meno. Qualunque cosa abbia due distinti stati, così da poter rappresentare una unità di informazione. Il nostro computer è una foresta densa di fili, e ciascuno può avere o troppi o troppo pochi elettroni. Se ne ha troppo pochi, pensiamo che il filo sia nello stato che chiamiamo *uno*; se ne ha troppi, lo pensiamo come *zero*. D'ora in avanti dobbiamo assicurarci che nessun filo abbia una deficienza di elettroni che stia all'incirca in mezzo. (Vedi, questa storia dei livelli non è senza prezzo; costruire un livello spesso comporta promesse - impegni ingegneristici, vincoli - che renderanno le cose un po' più complicate più in su. Ma così è la vita.)

Il bit è facile da definire; il difficile è rendersi conto che è utile. Se lo è!

[Seguono: notazione binaria, *switch*, *gate*, *circuit*]

Oppure un circuito può tornare indietro (*loop*) e alimentare se stesso - mordersi coda, per così dire. Questi circuiti non calcolano niente di nuovo, ma sono utili per un'altra ragione, essi *ricordano* i valori - zero o uno - di fili lontani, ben dopo che quei valori sono cambiati. Essi sono la *memoria* del cervello del tuo computer. Un altro indispensabile livello.

E questo ci porta al prossimo e più importante livello, il processore centrale - il boss. Il circuito finale, un chip pieno di fili e interruttori e porte e memorie, tutte interconnesse in un modo astuto per poter eseguire istruzioni, compiti come “addiziona questi due numeri e metti la loro somma in quel posto”. E, se ci pensi, per eseguire una tale istruzione devi fare quattro cose:

Devi prima *recuperare* l'istruzione, portarla fuori da dove sta e metterla in qualche posto comodo.

Quindi devi *decodificarla*, guardare ai suoi bit e parti e capire che cosa ti dice di fare, e a chi.

Quindi devi *eseguire*, far passare gli input specificati attraverso le porte del circuito giusto (l'addizionatore se si tratta di addizionare) finché non emerge il risultato.

Infine, devi *immagazzinare* il risultato dell'istruzione, in modo da poterlo ricordare quando esegui l'istruzione successiva.

I computer sono evoluti in modo spaventoso negli ultimi sessanta anni, ma queste quattro fasi sono rimaste pressoché le stesse [...].

Ma c'è un piccolo trucco che il boss applica a queste quattro fasi che merita di essere spiegato. Da quello che ti ho detto, potresti pensare che egli esegua le quattro fasi (*fetch*, *decode*, *execute*, *store*) di una istruzione e quindi passi a lavorare sulla successiva (*fetch*, *decode*, ecc.). No, il boss è più furbo. Una volta recuperata un'istruzione, una parte del processore procede a decodificarla, mentre un'altra parte recupera l'istruzione successiva.

Quando vai dal medico, Alexandros, prima un'infermiera ti prende pressione e temperatura, quindi il dottore ti visita (mentre l'infermiera si rivolge al prossimo paziente), e infine un tecnico di laboratorio magari ti preleva il sangue per un test (mentre il prossimo paziente è ora dal dottore, e quello dopo di lui dall'infermiera). Così tre pazienti sono contemporaneamente accuditi, ciascuno da uno di tre professionisti, e tutti sono occupati ed efficienti. Si chiama *parallelismo* - fare molte cose nello stesso tempo, in modo che tutti siano occupati - lo stesso principio su cui sono basate le linee di montaggio.

[...] In questo modo tutte le parti del processore sono utilizzate e le istruzioni sono eseguite quattro volte più velocemente.

Veramente, non proprio quattro volte, un po' meno. Perché vedi c'è un inghippo. Di tanto in tanto, la fase di recupero di un'istruzione può usare la stessa parte del processore centrale, la stessa porta, della fase di decodifica di un'altra istruzione. Oppure, la fase di esecuzione della prossima istruzione richiede dati che sono in corso di calcolo - e non ancora immagazzinati - dall'attuale istruzione. Se si dà questo caso, ed è sottile da scoprire, il processore si trattiene dal sovrapporre queste due fasi, e tranquillamente perde un colpo - altrimenti ne verrebbe un errore, e mica lo vogliamo, no?

Ed è onnipresente nei computer questa tensione tra la desiderabilità del parallelismo - fare molte cose allo stesso tempo, tenere occupate molte parti del computer - e la minaccia all'integrità del calcolo che è insita nel paral-

lelismo. Lo vedi quando prenoti un posto a teatro su Internet, Alexandros. Sei contento di non dover fare la fila come una volta, che il computer del teatro possa gestire in parallelo tutte queste richieste di posti. Ma non vuoi certo che il computer esageri con il parallelismo al punto di vendere lo stesso posto a te e a qualcun altro, no?

Il Web

L'illusione dell'uniformità è quello che il sistema operativo fa meglio. Il tuo sistema di file è un altro esempio; a te appare come un insieme ordinato di cartelle, ciascuna contenente altre cartelle e così via fino ai documenti. In realtà, frammenti di questi documenti sono sparpagliati sulla superficie del disco rigido nel modo complicato e confuso che a suo tempo è sembrato opportuno, ma l'illusione dell'uniformità te lo nasconde. E c'è ancora un altro clamoroso esempio dove una facciata di un enorme spazio uniforme è creata per nascondere un'incredibile varietà. Puoi immaginare di cosa si tratta?

Alexandros sarebbe stato imbarazzato a mancare questa opportunità. “La Rete, giusto?”.

Giusto. La Rete. Oh, ci sono quelli che sostengono che “rete” è il termine inteso per il conglomerato di *network* fisici che ci circondano, i cavi e i *router* e i satelliti e il resto (ne parleremo presto), non l'immancabile insieme di documenti che vivono nei suoi computer ospiti, puntando l'un l'altro indici accusatori, in attesa di essere visitati (*browsed*)). Mi piace il modo come la cultura popolare ha ignorato i puristi, e come lo stesso termine è usato sia per la formidabile struttura fisica sia per l'applicazione che ne ha reso conveniente la costruzione.

E la Rete trasuda una meravigliosa illusione di uniformità. Tu clicchi su un *link* blu in un documento sui Rolling Stone che stai visitando, locato in un computer in Irlanda, e sei trasportato per metà del globo in un oscuro angolo di Hong Kong da dove puoi scaricare “Honky Tonky Woman”. Oppure in un'altra parte del disco rigido dello stesso computer in Irlanda con cui stavi dialogando. In ogni caso clicchi sullo stesso *link*, lo stesso tipo di indirizzo sta sotto in ogni caso.

[...]

Ma torniamo all'ultimo argomento di questa lezione. Abbiamo discusso la Rete al suo livello più alto, il modo come ti si presenta, virtuale, liscia e omogenea. Ora dobbiamo guardare sotto la coperta, per ammirare i molti in-

telligenti strati che permettono tutto questo. Per esempio, che cosa è successo esattamente quando hai battuto la tua impertinente domanda alcuni secondi fa? Come è arrivata qui nel Kazakistan? È una storia lunga e affascinante. Fai attenzione.

Per cominciare, c'è un programma *browser* che gira in cima al tuo sistema operativo, giusto? Questo *browser* ti permette di leggere documenti dalla Rete e saltare da uno al successivo. Ogni volta che clicchi su un URL esso manda un messaggio a quel computer facendo richiesta del corrispondente documento, e il computer interrogato di solito consente; manda al tuo computer il testo e le figure e cos'altro è contenuto in quel documento. Il *browser* allora mostra l'informazione ricevuta.

Ma lo stesso *browser* fornisce anche certi servizi ad altri computer - si suppone servizi che sono utili a te. Per esempio, quando hai cliccato sul mio URL, il tuo *browser* ha ricevuto al richiesta di creare uno speciale *display* in cui la nostra sessione avrà luogo - sai, la fotografia [di Turing] e altro. Così è stato creato questo *display*, ancora un altro livello in cima al tuo *browser* - che, naturalmente, è un altro livello al di sopra del sistema operativo. La maggior parte del tempo, è su questo *display* che leggi i paragrafi che sto producendo di qui. Ma questo *display* funziona anche come un posto dove puoi comporre e sottomettere un input, come i moduli elettronici che compili quando compri qualcosa sulla Rete. Quando il sistema operativo percepisce che hai schiacciato un tasto, esso dice al *display* di cominciare a funzionare in quel modo: accumulare testo e, quando batti "enter", trasmetterlo qui da me.

Facile dire "trasmetti il paragrafo". Ma conta i passi, i livelli: il programma del *display* prima affida questo paragrafo al sistema operativo, con l'indicazione che dovrebbe essere trasferito in Kazakistan - l'indirizzo preciso è noto e fissato; questo programma del *display* manda dati solo qui. Il sistema operativo a sua volta critta i dati - i sistemi operativi lo fanno automaticamente oggi - e quindi passa il paragrafo crittato, insieme all'indirizzo a cui deve essere mandato, a uno degli apparati di *hardware* che controlla, la *network card*.

Questa carta è un sistema di risorse *hardware* e *software* che agisce come interfaccia tra il sistema operativo e i vari *network*. Molti *network*. Innanzitutto, hai quello *locale* del tuo dipartimento dell'Università, che connette i computer come il tuo e un paio di computer più specializzati che forniscono alcuni utili servizi, come il periodico *backup* dei tuoi file. Questo *network* locale è collegato ad Athena, che è molto più ampio e connette insieme tutte

le unità accademiche della Grecia. (Se fossi a casa, come eri la precedente sessione, allora sarebbe coinvolto invece il *network* del tuo *provider*, quella compagnia che ti connette per una piccola tassa.) Ora Athena è parte della Rete con la R maiuscola, la rete delle reti. Tutti i *network* che compongono la rete possono parlarsi l'un l'altro, così Athena può essere connessa in linea di principio con qualunque altro *network* della Rete, e in particolare con Silkroad, l'ampia rete che unisce la maggior parte dei computer nelle regioni del Kazakistan, Tadzhikistan e Uzbekistan - non pretendo di capire le politiche che intervengono qui.

Allora, come ha fatto il tuo paragrafo a viaggiare in questa giungla? Innanzi tutto è stato spezzato in una dozzina circa di unità di testo, pacchetti li chiamano, di circa una linea ciascuno. (Per quel che riguarda ondate di pacchetti, questo è veramente piccolo; in confronto, un video clip potrebbe consistere di molti milioni di tali pacchetti, uno scenario olografico ancora molti di più.) Ciascun pacchetto è stato quindi inserito in una specie di busta, con l'indirizzo preciso scritto sulla busta. Da ora in avanti, ogni busta va per sé; esse coraggiosamente attraverseranno la Rete una alla volta e si incontreranno di nuovo a destinazione - si spera. La prima busta è presa e via, se ne va, attraverso la cosiddetta porta seriale del tuo computer; ora è una sequenza di impulsi su un filo, ogni impulso una metafora per un bit, ogni gruppo di bit la codifica di un carattere del tuo testo o del suo indirizzo - ah, i livelli, i livelli ... La *network card* del tuo computer saluta la partenza. Aspetterà con ansia di avere notizie di questa busta prima di mandarne un'altra là fuori.

Il *network* locale guarda l'indirizzo, recepisce che deve uscire e senza por tempo in mezzo lo incanala al *gateway*, un punto speciale della rete locale che è anche parte di Athena (a rigore, la busta è stata inserita in ancora un'altra busta per il breve tragitto all'interno del *network* locale.)

Athena, come tutte le reti, ha diversi computer specializzati il cui compito principale è di far muovere le buste che vengono loro passate - sono i postini della Rete. Allora, immagina di essere un postino sulla rete Athena, e ti arriva una busta. Cosa fai? Bene, guardi l'indirizzo, guardi la rete intorno a te e passi la busta a un altro postino, uno che sta nella direzione generale indicata dall'indirizzo, e tra tutti scegli quello che ti sembra meno occupato e più accessibile al momento. Il prossimo postino fa la stessa cosa, e dopo un po' di questi salti la busta arriva a un *gateway*, un computer postino di Athena che tratta il traffico verso altre reti, alla Rete.

Il *gateway* si rende conto che la busta deve raggiungere la lontana Silkroad,

e allora fa la stessa cosa - solo a un livello più alto: la manda un salto in avanti, al *network* che gli sembra conveniente al momento. Su a un satellite che vola basso, giù dopo alcuni balzi a uno spesso cavo che attraversa l'Europa Orientale e parte della Russia e infine un altro balzo a un *gateway* di Silkroad. Di qui in poi bastano un paio di balzi all'interno di Silkroad ed ecco il *network* locale dell'istituto, bussando alla porta di Sultan, il mio computer. La *network card* di Sultan riceve la busta e, essendo quell'educato pezzo di silicio istoriato che è, manda indietro una gentile nota di ricevuto, un *acknowledgment* si chiama, "ricevuto, grazie, pronto per altri". Questo breve messaggio, nella propria busta con l'indirizzo del tuo computer, inizia il perigoso viaggio verso la Grecia, su per satelliti e giù per montagne; arriva a te attraverso un'altra strada, una rete in Germania e poi una in Italia e in Albania, con alcuni balzi finali in Athena e nel tuo *network* locale e infine nel tuo computer. E quanto pensi abbia impiegato questo avventuroso viaggio di andata e ritorno, Alexandros?

"Non so immaginare. Ma sono pronto a essere sorpreso", replica Alexandros.
Poi: "Tre secondi?"

Ben 179 millisecondi da quando la tua prima busta è partita. 179 millesimi di un secondo. Non puoi neanche battere le mani così velocemente.

La tua *network card* vede il "ricevuto" con sollievo, buona notizia, la prima busta è arrivata - vedi è una Rete pericolosa quella là fuori, computer guasti, linee intasate che lasciano cadere le buste in continuazione, i messaggi si perdono a destra e a manca. Ma questo tuo è passato indenne e allora, incoraggiata da questo primo successo, la tua *network card* manda ora non una sola busta, ma un certo numero - ciascuna segue la sua strada particolare nella Rete, ma partono tutte allo stesso istante. Se la Rete sembra benevola e tranquilla, possiamo provare a infilare carichi più pesanti, e se questi hanno successo altri ancora più pesanti. Ma se nel corso di questi tentativi non arriva nessun *acknowledgment* o ne arrivano meno dei pacchetti che sono stati spediti, la tua carta allora decide che la Rete è ora troppo occupata; ha perso una busta da qualche parte nell'agitazione e allora conviene a tutti rallentare un poco. Allora tenterà di rispedire l'ultimo insieme di buste, ma a un passo più lento.

E così via, finché l'ultima busta è arrivata, meno di un secondo dopo che hai premuto "enter", e la *network card* di qui ha estratto i pacchetti dalle buste e li ha ricomposti nell'ordine giusto, li ha passati al sistema operativo di Sultan che le ha decifrate (usando la chiave crittografica su cui si erano

accordati i nostri computer all'inizio della sessione) e ha trasmesso il messaggio pulito a me. E io l'ho letto e ho iniziato a lavorare ad una risposta acconcia, che ho composto e rimandato a te nello stesso modo, solo un paio di secondi dopo.

La vita

Mi meraviglia che nessuno di voi due sia al corrente del mio lavoro in biologia. [. . .] Morfologia, come forma e figura possono emergere da una piattaforma puramente chimica.

[. . .]

La vita. Non si vive senza di essa, non la si può definire. Oceani di inchiostro sono stati versati nello sforzo di identificare le sue caratteristiche fondamentali, definitorie. Sai quale è la mia preferita? Diversità. Eterogeneità. Struttura. Un organismo vivente esibisce una varietà di forme molto maggiore di quella che vediamo nel mondo inanimato. Sì, se dovessi scegliere un attributo che separa gli organismi viventi dal resto della creazione, sarebbe la loro estrema eterogeneità.

“Ma la distribuzione della massa nell'universo non è anche estremamente eterogenea, galassie, stelle, pianeti . . . ?”

Vero. Su scala cosmica, la gravità è capace di creare e di mantenere un'enorme eterogeneità. Ma quaggiù è la vita che difende l'eterogeneità. I fenomeni fisici familiari - dissipazione di calore, diffusione - sembrano tutti spingere nella direzione di una superiore omogeneità, uniformità, minore diversità e complessità. Ma la vita ha trovato modo di resistere alle pressioni verso l'omogeneità, di creare e mantenere la diversità. Persino l'infima cella singola ha il suo nucleo e citoplasma e membrana cellulare e mitocondri e organelle, con la sua caotica trama di meccanismi regolatori, si può a buon diritto considerare più eterogenea e complessa e interessante di una stella. E gli organismi superiori hanno un disegno del corpo, spesso un sistema nervoso e circolatorio, centinaia di diversi tipi di cellule. Come sorge tutta questa gloriosa diversità?

“Non capisco, se la diversità è una caratteristica esclusiva della vita, come spieghi il fiocco di neve?”

Ah, i fiocchi di neve. Belli, radiosi, complessi. Tuttavia essi confermano la mia tesi. Vedi, non ci sono due fiocchi di neve uguali, ma ogni fiocco di neve soccombe alla tirannia della perfetta simmetria esagonale. Quando ammiri i

loro eleganti disegni caleidoscopici è facile dimenticare che sono la manifestazione di una simmetria imposta e noiosa. E la simmetria è naturalmente la forma fondamentale di omogeneità. Per realizzare la loro eterogeneità, gli organismi viventi devono prima rompere i ceppi della simmetria. È lunga la strada dalla quasi perfetta simmetria dell'uovo fertilizzato al corpo umano, così decisamente non sferico. Le leggi della fisica e della chimica sembrano incapaci di spiegare questo sviluppo perché, vedi, queste leggi non trattano alcuna direzione in modo preferenziale: la geometria di queste leggi è perfettamente sferica.

[Come si rompe una simmetria, equilibrio instabile]

Questo è uno dei molti artifici che la vita usa per rompere la simmetria, per spareggiare: essa costruisce una situazione di equilibrio instabile, quindi si tira indietro e sta a guardare mentre la simmetria va in pezzi. La prima eliminatoria è la corsa degli spermatozoi concorrenti che penetrano l'uovo nello stesso tempo - si vuole evitare la polispermia no? Facile. Anche il più minuscolo vantaggio di uno spermatozoo viene spaventosamente amplificato, il suo arrivo innesca processi che chiudono le porte chimiche e lasciano fuori i perdenti. Questo deve essere fatto con la velocità del fulmine, un secondo o anche meno. La velocità richiesta è tale che la diffusione chimica non è più abbastanza veloce, entrano in gioco correnti e potenziali. (A proposito, c'è un altro posto dove la velocità è ottenuta in questo modo, il neurone.)

Allora lo spermatozoo vincitore entra trionfante; consegna il suo prezioso carico, il suo messaggio, il contributo del padre - in duplice copia - all'essere che ora verrà sintetizzato. Ciascuno degli spermatozoi concorrenti ha una versione differente di questo messaggio, ha scelto e raccolto diverse parti dell'informazione genetica del padre - qualcosa proveniente dalla nonna paterna e qualcosa dal nonno paterno. Se il messaggio del vincitore contiene una linea speciale - il cromosoma Y lo chiamiamo - allora il neonato sarà un maschio, altrimenti una femmina.

Nel frattempo il messaggio della madre è stato avidamente in attesa, nel centro dell'uovo, anch'esso in duplice copia. Le due copie del maschio si avvicinano esitanti e i quattro iniziano una danza, tutti e quattro insieme per un po'. Immagina quattro danzatori, due uomini e due donne, che si mescolano a caso vicino al centro di un'enorme sala da ballo rotonda. Alla fine in qualche modo si formano due coppie. Allora (un semplice trucco chimico) le due coppie inizieranno a respingersi l'un l'altra finché non si troveranno a ballare graziosamente ai poli opposti della sala. In questo modo

individuano un asse che prima non c'era; la simmetria della sala da ballo si rompe, un equilibrio instabile di nuovo, le coppie sanno come dividersi il territorio - questa metà a noi, l'altra a voi. Si forma un anello intorno alla cellula che la stringe; presto la cellula assume la forma di un'arachide finché un'ultima pressione dell'anello la rompe in due cellule - ancora in contatto naturalmente, come bolle siamesi - ciascuna con la piena informazione genetica di padre e madre insieme. Il processo prende alcune ore. Un passo tranquillo, c'è un sacco di tempo. Vedi, siamo mamiferi, quindi il nostro embrione è caldo, chiuso, protetto - nei pesci e negli insetti la divisione cellulare deve procedere a un passo molto più affannato.

Le due cellule hanno esattamente la stessa informazione, o lo stesso *blueprint*, ma non avranno lo stesso destino. Una diventerà la parte sinistra del bambino, l'altra la destra. Una si dividerà lungo l'asse su-giù, l'altra secondo l'asse avanti-dietro. Problema, come fanno a saperlo? Questo è il miracolo della differenziazione cellulare. Una cellula sa se essa è parte del tuo fegato o di una tua unghia, fibra muscolare o neurone, e si comporta di conseguenza. Tutte le cellule portano la stessa informazione, ma esse attivano parti differenti a seconda del loro destino e missione, producono le sostanze chimiche giuste, creano e mantengono l'ambiente chimico adatto.

[...]

In prima approssimazione sappiamo cosa succede, una mutazione in uno di questi geni e il tuo cuore finisce a destra, il fegato a sinistra, le budella si attorcigliano in senso antiorario. Ma la questione è, come fanno questi geni - mutanti o no - ad attivarsi in una sola delle due cellule? La risposta è, ancora una volta, equilibrio instabile. Le due cellule iniziano una gara di urla, per così dire: entrambe gridano all'altra attraverso la membrana che le separa, al massimo dei loro polmoni "Io sarò la sinistra" - "No! lo sarò io". Tutto chimico naturalmente. Il fatto è che se una delle due è superata nella gara, anche di poco, allora è programmato che la sua voce diventi più debole; il vincitore di nuovo trionfa - non c'è pareggio in questo gioco, né vittorie di Pirro - il perdente lascia, accetta il suo destino di diventare la parte destra. Una soluzione soddisfacente in fondo, l'unico motivo di questa piccola guerra era di creare l'equilibrio instabile, di rompere la simmetria.

E avanti così. Le cellule si dividono di nuovo lungo assi che sono dettati dalle loro diverse identità, la sinistra si divide tra davanti e di dietro, la destra tra superiore e inferiore. Le coordinate di base del corpo del bambino sono state così stabilite. Presto ci saranno otto cellule, sedici, una nuova divisione

ogni poche ore, ogni cellula con un'intima conoscenza del suo destino preciso, della sua esclusiva destinazione e dovere. Un mucchio di bolle che rotola per il condotto ovario, sempre più bolle, più piccole e più piccole finché alcuni giorni dopo la fertilizzazione il fascio si attacca alle pareti dell'utero e lo stimola in modo che inizi a formarsi una placenta. L'embrione è esploso in una popolazione, ma non nella sua massa; è ancora approssimativamente della misura dell'uovo originale, mettendo insieme un centinaio circa di cellule. Ha fatto tutta questa crescita senza nutrizione, ma ora se ne prenderà cura la placenta. L'embrione è già cavo all'interno; presto assumerà la topologia di base del corpo umano - che, nel caso tu lo abbia dimenticato, è quella di un tubo, un cilindro vuoto di tessuto che delimita il canale digestivo, dalla bocca all'ano.

[...]

“Se mai scrivessi un codice così complesso per una applicazione così delicata, mi aspetterei migliaia di sottili bachi, disastri dietro l'angolo, utenti irati che telefonano tutti i giorni”.

Solo che questo codice è stato testato, *debugged*, aggiornato per mille milioni di anni - non due mesi, lo standard dell'industria di oggi, se non sbaglio. Gli utenti irati si sono tolti di mezzo da tempo; solo quelli felici sono sopravvissuti a raccontare la loro storia, a trasmettere il codice, spesso modificato, qualche volta migliorato.

[...]

“È tutto nei geni”. Vero. Solo che non è proprio una risposta soddisfacente. Naturalmente è nei geni, lo sapevamo alla fine degli anni Quaranta, anche se non capivamo allora la precisa incarnazione biochimica di quelli che chiamavamo geni. La doppia spirale non aveva ancora sollecitato la nostra mente, Rosalind Franklin lavorava indefessa a Londra a scandagliare il nucleo, Watson e Crick nella mia *alma mater* aspettavano con ansia le sue fotografie. Ma la vera domanda è, quali sono le precise strategie impiegate, quali le precise leggi fisiche sfruttate dai geni per creare motivi, per rafforzare l'eterogeneità?

Come ci si sarebbe dovuto aspettare, la risposta non è unica, la vita usa il solito confuso assortimento di stratagemmi opportunistici mescolati, imparati nel corso di milioni di anni. Ma voglio menzionarne uno che trovo particolarmente affascinante. Guarda le tue mani, le tue dita, delicati strumenti di precisione, bella linea vero? Ma come crescono le dita di un bambino? Quando ci pensi la prima volta, immagini probabilmente che, una volta che braccia e gambe hanno assunto la lunghezza appropriata, cinque monconi spuntino

da ciascuna. No, non è questo il modo come accade - sarebbe probabilmente troppo complicato da controllare con la necessaria precisione. Invece fuori da ogni braccio e gamba cresce un corpo piatto, compatto, molto simile a un guanto da pugilato, senza che siano discernibili le dita. Quindi le cellule che occupano le posizioni dove devono esserci gli spazi semplicemente muoiono. Si ordina loro di morire, ed esse ubbidiscono; l'indentazione interdigitale appare come per magia. La morte come strumento di sviluppo, c'è un sacco da pensare qui.

Ma il trucco più intelligente è quello che ho scoperto io più di cinquanta anni fa. Non una scoperta veramente, ma la predizione teorica che, in effetti, l'eterogeneità può emergere spontaneamente. Immagina una striscia di tessuto animale dove interagiscono due sostanze chimiche - diciamo per esempio una sostanza nera ed una bianca. Ma il modo come interagiscono è complicato: la sostanza nera è un *catalizzatore*, che permette la composizione di entrambe le sostanze, mentre la bianca è un *inibitore*, che le distrugge entrambe. Supponiamo che al momento ci sia ovunque la stessa concentrazione di catalizzatore e la stessa concentrazione di inibitore, e di fatto queste concentrazioni siano tali che i loro effetti si annullano, nessun incremento o diminuzione di nessuna delle due sostanze. Stessa tonalità di grigio ovunque. Omogeneità. Equilibrio.

“Lasciami indovinare, è instabile”.

Proprio così. La calma prima della tempesta, una palla sulla cima di una cupola, in posizione infelice. Anche il più minuscolo, più localizzato aumento della concentrazione del catalizzatore nero porta a una drammatica rottura dell'equilibrio; bianco e nero si separano, il nero si concentra in pochi posti, disposti regolarmente sulla striscia di tessuto, il bianco predomina in tutto il resto. Sembra impossibile, contro intuitivo, ma succede, nessun dubbio. L'ho dimostrato nel mio articolo, nel 1952, con le equazioni e tutti i crismi. Uno dei miei ultimi articoli pubblicati. Oggi lo chiamano “instabilità di Turing”, se posso vantarmi un po' ...