

## La candela

Ho deciso: prenderò il toro per le corna, e affronterò un argomento che rimando da anni. C'è una parola, che per qualcuno dei collaboratori di questa rivista, e penso anche per parecchi dei lettori, è quasi una parolaccia, di quelle di cui scusarsi quando scappano dette: “riduzionismo.” Mi propongo di dimostrare che le cose sono alquanto più complicate di come talvolta si crede; che forse ci sono addirittura degli equivoci semantici, per non dire filosofici. . .

Per cominciare, occorrerebbe mettersi d'accordo su una definizione. Ne ho trovata una nel ben noto libro di D. Hofstadter: *Gödel, Escher, Bach*.

“Riduzionismo è la convinzione che un intero possa essere capito completamente se se ne comprendono le parti, e la natura della loro ‘somma’.”

Un'altra se ne trova invece in *L'io e il suo cervello*, di Eccles e Popper, ed è ovviamente dovuta a Popper:

“... l'idea intuitiva secondo cui [...] ciò che accade ad un tutto può essere interpretato mediante la spiegazione della struttura (la disposizione) e dell'interazione delle parti.”

Come si vede le due definizioni sono pressoché identiche, sebbene le posizioni dei due autori riguardo al riduzionismo siano parecchio diverse. Questo mi tranquillizza, perché indica che almeno sul punto di partenza l'accordo è abbastanza ampio.

Popper approva il riduzionismo come programma di ricerca, e anche come programma della scienza stessa; ma non crede sarà mai realizzabile per intero. Sicuramente non lo ritiene realizzato in nessun caso concreto dell'indagine scientifica: neppure in casi relativamente “semplici,” come la riduzione della chimica alla fisica.

La posizione di Hofstadter è più complessa, e non la saprei riassumere in poche righe; ma dal momento che non è troppo diversa dalla mia, riuscirà implicitamente chiara dal resto del discorso.

Una prima questione, toccata da entrambi gli autori, è la riduzione “in linea di principio.” Con questo si vuol dire che una riduzione può non essere praticamente possibile, ma basta (per un riduzionista, o almeno per qualcuno fra loro) che lo sia appunto in linea di principio, ossia che si sappia come andrebbe condotta, anche se ostacoli pratici, come ad es. un'estrema complessità di calcoli, ne impediscono la realizzazione.

È questo il caso della riduzione della chimica alla fisica, dove il “tutto” può essere una molecola, e le parti sono ovviamente gli elettroni e i nuclei. L'ideale della riduzione sarebbe di poter prevedere/calcolare tutte le grandezze/proprietà

interessanti della molecola a partire dai dati dei nuclei e degli elettroni (cariche, masse) e dalle loro interazioni conosciute (interazione elettrostatica, eventualmente magnetica).

Dal punto di vista del fisico teorico, il problema quasi non esiste: le leggi fisiche fondamentali sono note con eccellente sicurezza, e tutto si riduce a risolvere un'equazione di Schrödinger. Purtroppo appena si lasciano molecole assai semplici, come  $H_2$ , l'equazione acquista un numero di dimensioni troppo grande per poter essere data in pasto anche ai più potenti computer oggi esistenti, e quindi se si vuole cavar fuori qualche risultato bisogna ricorrere ad approssimazioni, modelli, ecc.: il mestiere del chimico teorico.

Intendiamoci subito, prima che qualche chimico legga l'ultima frase in senso svalutativo. È ben vero che ci sono fisici teorici che pensano proprio che quello del chimico teorico sia un mestiere per così dire di serie B, appunto perché si occupa di questioni "materiali," come trovare il modo pratico per estrarre risultati da un problema complicato. La "vera" ricerca sta ovviamente più in alto: nell'indagine sui principi e le leggi generali. Dato che per quanto riguarda atomi e molecole questi sono ormai ben noti, per la fisica teorica la materia ha perso interesse.

Ma anche restando alla fisica, i casi in cui i problemi risolubili "in linea di principio" debbono essere ricondotti a dimensioni trattabili, per cavarne qualcosa di comprensibile, non mancano certo; per fare un solo esempio, si pensi alla struttura dei nuclei, che è ancora di competenza dei fisici... Dunque non è nemmeno questione di fisica o di chimica, ma piuttosto di tipo di problemi, o di ambito di fenomeni.

Un esempio interessante, che sta a metà strada tra una riducibilità in linea di principio e una riduzione reale, l'ho appreso di recente. Forse qualcuno tra chi mi legge avrà sentito parlare dell'ipotetica variazione nel tempo della velocità della luce. Debbo resistere alla tentazione di raccontare di che si tratta, per non uscire del tutto dal mio tema: chi volesse un mio riassuntino può trovarlo in <http://www.df.unipi.it/~fabri/divulgazione/alpha/alpha.htm>

Basti sapere che Webb e coll. hanno condotto una ricerca per vedere se ci siano indicazioni di una variazione delle costanti fondamentali su scala cosmologica; nel corso del lavoro si sono trovati nella necessità di confrontare le misure di frequenza da loro prese per certe transizioni atomiche, con i dati disponibili. Si trattava di transizioni nell'ultravioletto, spostate nel visibile a causa del redshift cosmologico, relative a ioni  $Mg^+$  e  $Fe^+$ . Con loro sorpresa, hanno scoperto che non esistevano calcoli teorici abbastanza precisi per quelle frequenze; hanno perciò dovuto affrontare il problema di calcolarsele ex-novo.

Perché ho detto che l'esempio sta a metà strada? Perché da un lato si trattava di un problema complicato sulla struttura atomica, che evidentemente non era stato finora ritenuto abbastanza interessante da dedicarci uno sforzo notevole. Tutti erano sicuri che non ne sarebbe venuto niente di nuovo, per la

ragione che ho detta sopra: le interazioni che entrano in gioco sono perfettamente conosciute, e non c'è da aspettarsi sorprese. In questo senso quindi si vede che la riduzione perfino delle strutture atomiche ai principi base è tutt'altro che completa. . .

D'altra parte la riduzione era effettivamente possibile: bastava solo mettersi d'impegno, e avere una motivazione per la fatica e il tempo necessari per portare a termine il calcolo.

\* \* \*

Capite perché, anche sulla base di questo esempio, io non mi sento di concordare con Popper, che ritiene non realizzabile una completa riduzione della chimica alla fisica, e scrive: "questo genere di programma di riduzione intuitiva è in contrasto con alcuni risultati della fisica moderna." Nelle pagine che seguono Popper cerca di motivare tale asserzione; proverò, per quanto mi riesce, a darvene conto, ma non aspettatevi un'esposizione chiara, perché io stesso non ho capito molto il punto di vista di Popper. . .

Incomincia presentando una tabella, di cui vi do solo una parte, per brevità:

- ...
- 5. Liquidi e solidi (cristalli)
- 4. Molecole
- 3. Atomi
- 2. Particelle elementari
- 1. Particelle sub-elementari
- 0. Ignoto: particelle sub-sub-elementari?

Nei livelli superiori si sale dagli organelli agli ecosistemi, ma per quello che ho da dire non ne ho bisogno.

Ora Popper identifica, o almeno condiziona, il programma riduzionista con quella che chiama "causalità verso l'alto": il rapporto di causa-effetto deve andare solo da un livello inferiore a uno superiore, e mai viceversa. Popper aggiunge: "ciò che accade ad un livello superiore può essere spiegato nei termini del livello inferiore sottostante, per arrivare infine a spiegare tutto con le particelle elementari e con le relative leggi fisiche. Appare subito chiaro che i livelli superiori non possono agire su quelli inferiori."

Nel seguito si trovano esempi che secondo Popper contrastano questa tesi. Riassumo rapidamente: un cristallo interagisce con (influenza) i fotoni o altre particelle che l'attraversano. Di più (aggiungo io): il cristallo influenza fortemente gli stessi elettroni degli atomi di cui è composto. Ancora: ogni dispositivo macroscopico, perfino un semplice cuneo, agisce influenzando le particelle (atomi, molecole) del materiale di cui è costituito, e di quello con cui entra in contatto. Ultimo esempio: una stella, attraverso la pressione dovuta alla sua gravità, modifica fortemente addirittura i nuclei al suo centro, dato che l'innalzamento di temperatura rende possibili le reazioni nucleari.

Popper osserva poi che gli esempi più interessanti di causalità verso il basso si trovano ai livelli superiori della tabella, dove alloggiano gli organismi e le popolazioni. Benissimo: tutto vero.

Tuttavia mi pare che in questo ragionamento ci sia un equivoco di fondo: Popper confonde *spiegazione* e *relazione causale*. Dà per scontato che la prima implichi la seconda, sì che l'esistenza di una causalità verso il basso renda impossibile una spiegazione dal basso verso l'alto, ossia riduzionista. Non vorrei insistere su questo punto, perché il problema della spiegazione dovrò riprenderlo in seguito. Voglio invece accennare a un altro aspetto della critica di Popper al riduzionismo.

“... i nuovi ordinamenti atomici possono condurre a proprietà fisiche e chimiche non derivabili da un'asserzione descrittiva dell'ordinamento degli atomi unita ad un'asserzione della teoria atomica. [...] Alcune proprietà importanti, tra cui anzitutto alcune delle proprietà del DNA, si comprendono bene sulla base della struttura atomica; eppure [...] siamo ben lontani [...] dal derivare o dal predire a partire da principi primi anche solo la maggior parte delle proprietà delle macro-molecole infinitamente varie.”

Con tutto il rispetto, mi pare che ci sia un chiaro salto logico. Un conto è dire che “siamo ben lontani dal derivare o dal predire,” un altro dire che la derivazione sia impossibile, punto e basta. . .

Ma su Popper ho detto abbastanza; vorrei proporre un'interpretazione alternativa, che a me pare più convincente e che — come ho già detto — si ritrova sostanzialmente in Hofstadter. Per spiegarmi nel modo migliore, mi servirò di un esempio: quello della struttura dei computer.

Attenzione: l'esempio non ha affatto lo scopo di proporre analogie tra computer e organismi viventi (e tanto meno pensanti . . .). Mi serve solo per mostrare come le difficoltà relative ai diversi livelli, analoghi a quelli della tabella di Popper, si producano anche in sistemi che sicuramente padroneggiamo completamente, dal momento che sono stati pensati, progettati e realizzati da noi. Questo mi porterà a formulare l'ipotesi che la difficoltà abbia tutt'altra origine di quelle prospettate dai sostenitori delle “proprietà emergenti.” Ma vediamo. . .

\* \* \*

Al livello più basso, un computer è un aggregato di *componenti elementari* (transistor, diodi, resistenze, condensatori . . .) il cui funzionamento ci è perfettamente noto, la cui riduzione alle leggi generali della fisica è fuori discussione. E comunque, non ho neppure bisogno di pensare a questa riduzione: posso prendere il livello dei componenti elementari come il primo gradino della scala.

Mettendo insieme un certo numero di questi componenti, si realizzano delle strutture più complesse: *circuiti bistabili* (flip-flop), *porte logiche*. . . Si tratta di costituenti essenziali di ogni computer, dal momento che un flip-flop è l'unità

elementare di *memoria*: un oggetto che possiede due stati stabili, in ciascuno dei quali può persistere indefinitamente, mentre passa dall'uno all'altro se riceve un opportuno impulso in uno di due ingressi. Fa parte dei primi esercizi dell'elettronica digitale lo studio di un tale circuito, in termini delle proprietà dei componenti elementari: quindi nessun dubbio circa la riducibilità di questo livello a quello immediatamente inferiore.

Lo stesso vale per le porte logiche. Storicamente, il prototipo di questi circuiti è il “circuito di coincidenza di Rossi” (materia di studio in un corso di laboratorio, quando ero studente . . .). Si tratta di un circuito che fu inventato (da Bruno Rossi, appunto) per segnalare la scarica simultanea di due contatori Geiger. Veniva usato per lo studio dei raggi cosmici: disposti due contatori a una certa distanza, uno sopra l'altro, la loro scarica simultanea indicava che una stessa particella li aveva attraversati entrambi, e se ne poteva quindi determinare la direzione di arrivo. (Questo si chiamava un “telescopio” di contatori.)

Nei computer il circuito di coincidenza diventa un circuito AND, che dà risposta affermativa (livello “1”) se e solo se entrambi gli ingressi indicano “1.” Con questo circuito, e con un semplice invertitore (NOT: dà “1” quando l'ingresso è “0,” e viceversa) si possono costruire tutte le funzioni, anche le più complicate, dell'algebra di Boole, ossia del calcolo delle proposizioni. Oppure, da un altro punto di vista, si possono realizzare tutte le operazioni dell'aritmetica in base 2. Ovvio che anche le porte logiche si lasciano analizzare in termini di componenti elementari.

A prima vista, il gioco è fatto: abbiamo le operazioni logiche e aritmetiche; abbiamo gli elementi di memoria. . . Che altro occorre per fare un computer? “In linea di principio” nient'altro; ma in pratica le cose sono un pochino più complicate (e interessanti) come ora mostrerò.

Cominciamo con l'osservare che l'ingegnere elettronico (di decenni fa, perché oggi le cose si fanno in modo diverso . . .) che doveva progettare un circuito elettronico digitale, magari un intero computer, non avrebbe minimamente pensato di ricondursi ogni volta ai componenti elementari: transistor ecc. Disponeva, già 30 anni fa, di *circuiti integrati a piccola scala* formati di molti componenti elementari, e di cui erano note (descritte in manuali) le *funzioni*: flip-flop, porte logiche di vario tipo. . . Ragionava perciò su questi componenti funzionali, prescindendo (quasi sempre) dalla loro realizzazione concreta e dalla riduzione alle leggi della fisica.

Come vedete, abbiamo già tre gradini della scala:

2. Circuiti integrati a piccola scala
1. Flip-flop, porte logiche
0. Transistori, diodi, resistenze. . . .

Spero sia chiaro che già a questo punto la riduzione, perfettamente possibile in linea di principio, e anche fattibile senza gravi ostacoli, di fatto non viene più tentata.

Ma perché non viene neppure tentata? È qui che la mia risposta si distanzia da quelle tipo Popper: a mio parere perché *sarebbe di ostacolo alla comprensione del sistema.*

\* \* \*

Per capire ancora meglio questa tesi, conviene procedere nell'esame della struttura di un computer, di cui siamo appena all'inizio... Ho scritto sopra che con le porte logiche si può fare tutta l'aritmetica: proprio per questa ragione sono stati realizzati altri circuiti integrati, più complessi (detti *a scala media*) che facilitassero il compito. Uno dei più semplici è un *addizionatore*, che fa esattamente ciò che la parola indica.

L'addizionatore possiede due gruppi d'ingressi, uno per ciascuno degli addendi. Gli addendi sono rappresentati in base 2, e quindi appaiono come livelli di potenziale sulle linee d'ingresso: più alto per l'"1," più basso per lo "0." Se vogliamo sommare due numeri con 10 cifre binarie, ci occorreranno due gruppi di 10 ingressi. L'addizionatore possiede inoltre un gruppo di uscite, sulle quali appaiono le cifre della somma.

È chiaro che all'interno l'addizionatore consisterà di un insieme piuttosto complicato di porte logiche, e mi guardo bene anche dal solo accennare a come questo si fa in pratica. Assai più interessante osservare che anche il progettista di regola non ha bisogno di saperlo: gli basta che l'addizionatore, che per lui è un blocco chiuso, una "scatola nera," come spesso si dice, faccia quello che deve. E ciò è garantito dal fabbricante...

Altro integrato a media scala è il *contatore*. Anche questo è facile da descrivere: la sua funzione è di contare il numero d'impulsi che arrivano su un ingresso, e di presentare tale numero, nella solita forma binaria, in apposite linee d'uscita. Di nuovo: un contatore è composto da un certo numero di flip-flop e porte logiche, anche se non provo a spiegarne qui la struttura. Affermo invece che la sua conoscenza non è necessaria per poterlo adoperare come componente di un computer (e di fatto, gran parte degli utilizzatori può darsi non sappiano in dettaglio "com'è fatto dentro").

Passiamo ora a un altro livello, con un altro esempio. Se il singolo flip-flop è un elemento di memoria (di un bit) un computer ha una memoria (RAM) di molti molti bit. Per es. quello su cui sto scrivendo, che non è certo dei più grandi oggi esistenti, ha una RAM di oltre 4 miliardi di bit!

Se andate a guardare, troverete che tutta questa memoria è raccolta in pochi circuiti integrati *a grande scala*, il cui uso però è piuttosto semplice: si dà su opportuni ingressi un *indirizzo*, e all'uscita appare il contenuto di quel particolare bit di memoria. Oppure, con una variante, si comanda di scrivere in quel bit ciò che è scritto su un'altra linea d'ingresso.

Per amore di precisione, debbo dire che in realtà le RAM dei nostri computer non sono fatte di una moltitudine di flip-flop; ma il principio resta lo stesso. Sono sempre molti e molti costituenti semplici, capaci ciascuno di un bit di memoria,

montati insieme in un unico circuito integrato, che viene usato — ancora una volta — a scatola chiusa.

Ma debbo ancora parlare del più importante tra gli integrati a grande scala, il vero e proprio “cervello” del computer (ammesso che si possa usare questa espressione): mi riferisco alla CPU (“central processing unit,” ovvero “unità centrale di elaborazione”). Una moderna CPU può contenere alcuni milioni di transistor; la sua funzione è d’interpretare ed eseguire le *istruzioni*, seguire l’andamento di un *programma*, ricevere dalla memoria i dati e rinviare i risultati di ogni operazione che esegue.

Avete notato due parole in corsivo: “istruzioni” e “programma”: ne ripareremo. Ma intanto osserviamo che ancora una volta il progettista (e tanto più l’utente) del computer si guarda bene dal cercare di sapere come la CPU “è fatta dentro” (che è un modo colloquiale per indicare la riduzione . . .). Ciò che occorre al progettista (e in casi sempre più rari all’utente) è solo una descrizione *funzionale*, dalla quale si apprenda come si comporterà la CPU nelle diverse condizioni nelle quali si può venire a trovare nel corso del funzionamento della macchina. Potrei quasi dire, se non temessi di apparire provocatorio, che occorre e basta conoscere la risposta della CPU a tutti i possibili stimoli che possono provenirle dall’ambiente. . .

Questo tema dovrò svilupparlo nel seguito. Ma prima faccio notare che al punto a cui siamo la scala ha acquistato altri due gradini:

4. Integrati a grande scala: CPU, memorie RAM
3. Integrati a media scala: addizionatore, contatore . . .
2. Circuiti integrati a piccola scala
1. Flip-flop, porte logiche
0. Transistors, diodi, resistenze. . . .

\* \* \*

Com’era prevedibile, il tema non può essere svolto in una sola puntata, e dovrò quindi chiedervi lo sforzo di seguirmi anche nella prossima. Ma prima di chiudere vediamo dove siamo arrivati.

A parte le considerazioni iniziali sul riduzionismo in generale e sul punto di vista di Popper, vi ho proposto una tesi (per ora solo accennata): che la vera difficoltà di una riduzione di una scienza all’altra abbia tutt’altra origine da quella che viene di solito presentata: la supposta impossibilità di dar conto delle “proprietà emergenti.”

Per precisare e sostenere la mia tesi, vi sto proponendo la descrizione per sommi capi della struttura e del funzionamento di un computer: non perché il computer possa essere preso a modello di altri sistemi dei quali più ci si preoccupa quando si parla di riduzione, ma solo perché a proposito di computer i termini del gioco sono chiari. Il computer è un oggetto artificiale, interamente pensato,

progettato e costruito da noi, e per il quale è difficile mettere in dubbio la riducibilità a oggetti e leggi fisiche di base.

Se perciò dovessimo scoprire che anche per un computer nascono dei problemi quanto a un'effettiva riduzione, dovremo cercarne le cause da qualche altra parte. Ho già fornito alcuni indizi, ma è ormai il caso di lasciare la scoperta del colpevole ammantata di un'opportuna suspense. . .