Le parole del futuro

Università Cattolica del Sacro Cuore

Facoltà di Scienze matematiche,
fisiche e naturali

Numero
Tempo
Intelligenza

VITA E PENSIERO

www.vitaepensiero.it

ISBN 978-88-343-4763-8

Indice

Premessa

Quadro storico-prospettico

Quando ancora non esisteva la Facoltà di Scienze matematiche, fisiche e naturali

Cento anni fa, quando nacque l'Università Cattolica del Sacro Cuore, le Scienze matematiche e fisiche erano un po' diverse da quelle che conosciamo oggi, e soprattutto era diversa la loro collocazione nella società (e probabilmente anche nella cultura). Le Scienze matematiche avevano appena conosciuto quella che probabilmente è stata la rivoluzione concettuale più importante di tutta la loro esistenza dai tempi di Euclide, e cioè la scoperta del concetto di assiomatizzazione che sostanzialmente pone al punto centrale la relazione che intercorre fra le affermazioni iniziali, considerate vere in maniera convenzionale o comunque evidente, e le proposizioni da esse dedotte per via logica: come si vedrà poi negli anni successivi, anche il concetto di 'via logica' verrà approfonditamente analizzato e criticamente rivisto. Con questo si può dire che con la matematica del '900 si dà, per semplificare all'estremo, più rilievo al concetto di implicazione rispetto all'enunciato di una certa affermazione matematica. Volendo addurre un esempio molto semplice, era noto a Euclide che esistono infiniti numeri primi, e un matematico del '700 avrebbe senz'altro riportato questo teorema affermando che «esistono infiniti numeri primi». Un matematico del '900, pur ovviamente riconoscendo che l'affermazione sostanziale resta la stessa, avrebbe probabilmente puntato il dito sul fatto che: «*Se* si accettano gli assiomi sui numeri naturali, *allora* esistono infiniti numeri primi» (o, meglio ancora, dato un numero primo, esiste un altro numero primo strettamente maggiore di esso, per evitare l'uso della parola 'infiniti' che pure fu un concetto ampiamente analizzato in quell'epoca).

Dal lato della fisica, per usare un termine giornalistico moderno, si era ancora 'sotto choc' per l'osservazione nel 1919 dell'eclissi totale di Sole che aveva mostrato la deflessione dei raggi di luce ad opera del campo gravitazionale solare, confermando così in maniera spettacolare una delle più grandi rivoluzioni concettuali (probabilmente non solo della fisica ma dell'intero pensiero umano): la teoria della Relatività. Einstein, unico e indiscusso inventore, viene in quegli anni catapultato alla ribalta anche del mondo della vita quotidiana (con buona pace del fatto che pochi possono capire il contenuto delle sue teorie scientifiche) e la fisica teorica fa il suo ingresso trionfale nella Scienza moderna. Di lì a pochi anni un'altra grande rivoluzione, di natura e portata diverse ma non per questo meno significativa, doveva sconvolgere la fisica: la meccanica quantistica, sulla quale torneremo più avanti.

Anche le Scienze naturali avevano vissuto, per la verità qualche anno prima, un'analoga stagione d'Oro con l'affermazione o con l'enunciazione delle teorie darwiniane ed erano oggetto di profondo dibattito culturale all'interno della comunità scientifica mondiale e in generale dell'intero mondo culturale.

Comunque sia, le Scienze matematiche e fisiche (sulle quali ci concentreremo perché in Università Cattolica non esistono studi prettamente di Scienze naturali) erano incardinate nella società italiana in maniera profondamente diversa da oggi. Esse erano appannaggio di un ristrettissimo numero di studiosi, sia per la difficoltà per i ceti meno abbienti (particolarmente critica per la recente guerra mondiale e che, in misura diversa, permarrà fino agli anni Settanta) di raggiungere un livello di studio universitario, sia per la supremazia degli studi classici rispetto a quelli 'tecnici', come si diceva a quel tempo: la grande tecnologia italiana era ancora di là da venire, anche se va ricordato che nel 1909 Guglielmo Marconi era stato insignito del premio Nobel per la fisica, per i suoi contributi allo sviluppo della telegrafia senza fili. Le Scienze matematiche e fisiche erano quindi, nel panorama italiano, una fonte sì di dibattito culturale ma su eventi sostanzialmente provenienti dall'estero, oppure legate a singoli importanti studiosi, comunque però di stampo (dal punto di vista dell'impatto sulla società) prettamente ottocentesco (non così, val la pena di sottolinearlo, dal punto di vista concettuale: persone come Giuseppe Peano, Vito Volterra e molti altri conducevano ricerche a livello mondiale, come si direbbe oggi).

Cinquant'anni dopo

Cinquant'anni dopo la nascita dell'Università Cattolica del Sacro Cuore, nasce a Brescia la Facoltà di Scienze matematiche, fisiche e naturali, in un mondo profondamente trasformato, e non solo a causa della Seconda guerra mondiale.

Anche se le Scienze matematiche probabilmente non vissero in quei cinquant'anni la stessa rivoluzione concettuale (sebbene i contributi di Gödel avrebbero profondamente segnato il cammino della matematica in rapporto alle altre discipline, ma su questo non c'è lo spazio per approfondire qui) che avevano vissuto nei 50-70 anni prima del 1921, un nuovo tipo di rivoluzione stava prendendo piede, e cioè la capillare diffusione e necessità dei concetti matematici in tutti i settori della società. Due di questi hanno segnato quel cinquantennio: lo sviluppo tecnologico e industriale e l'incremento di complessità dei sistemi economici. Ovviamente essi non sono gli unici settori nei quali la matematica, perlomeno nei suoi concetti basilari, divenne essenziale, ma sono sicuramente due di grande impatto nella vita quotidiana. Accanto a ciò, la diffusione dell'editoria scientifica e il boom economico statunitense del dopoguerra stavano creando una fittissima rete di studi matematici in tutto il mondo e portavano ad un aumento (relativo) della cultura matematica nella società. Parallelamente, le ricerche matematiche cominciavano ad avere un'applicazione al di fuori di problemi specifici (come le Scienze fisiche, che ormai erano sempre più espresse da concetti matematici anche molto difficili), ma, grazie allo sviluppo (in fase ancora molto iniziale) del calcolo numerico, cominciavano a fare capolino nelle applicazioni industriali.

Le Scienze fisiche del 1971 erano invece reduci dalla loro seconda grande rivoluzione, testé citata, e cioè la comprensione dei fenomeni su scala microscopica, atomica e subatomica grazie alla meccanica quantistica. Una rivoluzione non solo concettuale e molto più problematica di quella legata alla nascita della Relatività, sia perché opera di più persone sia perché di natura (paradossalmente) ancora più controintuitiva della Relatività stessa, ma soprattutto perché investe un settore di applicazioni enormemente più vasto. Dopo le esplorazioni di tipo nucleare degli anni '30, che porteranno alla bomba atomica, il mondo scientifico e tecnologico inizia negli anni '40 e '50 lo studio dell'applicazione dei semiconduttori e dei laser che saranno destinati a una diffusione enorme nei 20-30 anni successivi, aprendo la strada alla società moderna della comunicazione.

In quei 50 anni intercorsi fra la fondazione dell'UCSC e della FSMFN vi fu anche una nascita: l'Informatica. Nata essenzialmente dalla rivoluzione logico-matematica dell'Ottocento che abbiamo sintetizzato sopra, l'Informatica teorica si innesta velocemente nello sviluppo industriale e adatta i suoi concetti di base alle nuove tecnologie emergenti, ma sarà soprattutto con gli anni Settanta e Ottanta che troverà la sua massima espansione e pertanto vi torneremo fra non molto.

In questo panorama culturale scientifico mondiale, l'UCSC, dopo aver aperto nella sede di Piacenza la

Facoltà di Agraria prima e nella sede di Roma la Facoltà di Medicina, muove i suoi primi passi all'interno delle Scienze matematiche e fisiche aprendo la FSMFN nella sede di Brescia sia per la presenza in quella città di numerose case editrici di tematiche scientifiche e in particolare anche matematiche, sia per una presa di coscienza che era tempo per l'Università cattolica di fornire il suo contributo alla formazione di una coscienza scientifica in campo matematico. L'istituzione di una facoltà dedicata, almeno inizialmente, alla formazione di giovani insegnanti nel campo matematico significa primariamente il voler formare persone in grado di dare un'impronta duratura nella società per quanto attiene ai concetti matematici non immediatamente elementari, quali quelli trattati nella Scuola Secondaria, formando così un substrato per la formazione delle più disparate figure professionali scientifiche.

Il Comitato ordinatore della FSMFN era costituito dai proff. Carlo Felice Manara (presidente), Giovanni Prodi (Università di Pisa) e Pietro Bassi (Università di Bologna). Si diceva della vocazione didattica. Il primo CdL in Matematica, quadriennale a ciclo unico, conteneva infatti soltanto l'indirizzo didattico, che però veniva delineato solamente nei secondi due anni, fornendo così allo studente un panorama di base delle discipline matematiche assolutamente uniforme nel panorama nazionale (come peraltro era necessario, viste le rigide specifiche ministeriali sul piano degli studi).

Sotto la guida del primo Preside, il compianto prof. Giovanni Melzi, la Facoltà compie i suoi primi passi e laurea con lode nel luglio 1975, la prima laureata in Matematica, la dott.ssa Maura Carlotti.

Sotto la guida dell'Emerito prof. Carlo Banfi alla presidenza della FSMFN viene deciso, nel corso degli anni '80, di allargare la missione della facoltà anche all'ambito applicativo, vista la già citata diffusione (che potremmo dire, non a vanvera) esponenziale della matematica in campo tecnologico economico e, da qualche anno, anche medico.

Infine, con l'inizio degli anni '90, viene attivato l'indirizzo generale, rivolto agli studenti che intendono intraprendere la via della ricerca scientifica. In questo modo il corso di laurea in Matematica risulta comprendere i tre indirizzi, generale, didattico e applicativo, previsti dall'ordinamento dell'epoca.

Fin dalla sua istituzione, la Facoltà prevedeva fra i suoi sviluppi anche l'accensione del corso di laurea in Fisica, in conformità con il binomio Matematica & Fisica presente anche nelle classi di concorso per l'insegnamento nella scuola secondaria di secondo grado. Dopo un articolato dibattito, il corso di laurea in Fisica viene infine attivato nell'a.a. 1997-1998 e risulta prevalentemente caratterizzato per l'attività di ricerca nella direzione della fisica dei materiali.

Sempre negli anni '90 si sviluppa il dibattito riguardante l'istituzione di un corso di Informatica. Inizialmente la questione non progredisce, perché l'Ateneo si sente di sostenere soltanto un diploma universitario (previsto dagli ordinamenti del tempo), non il corso di laurea, e la soluzione non pare culturalmente valida alla maggioranza della Facoltà. La situazione si sblocca con l'approvazione della legge 509 che, istituendo il 3+2, consente corsi di studio triennali suscettibili di prosecuzione (come non avveniva in modo naturale con il precedente diploma universitario). Nell'ambito dell'adeguamento alla legge 509, vengono quindi istituiti il corso di laurea triennale in Informatica e anche il corso di laurea triennale in Scienze ambientali, motivato sia dalla crescente rilevanza a livello mondiale delle tematiche coinvolte che dalla presenza a Brescia di realtà, quali l'allora ASM (ora A2A), fortemente interessate all'ambito ambientale.

Dal punto di vista delle tematiche trattate, la Facoltà si attesta quindi sul quadrinomio Matematica, Fisica, Informatica e Ambiente. Tuttavia, negli anni successivi, i requisiti di docenza imposti dal Ministero richiederanno di mettere in atto successivi accorpamenti a livello di corso di laurea triennale. Viceversa, anche negli anni recenti, ci sarà un ampliamento a livello di corsi di laurea magistrali, grazie alla proficua interazione con altre Facoltà dell'Ateneo.

Le tre parole

Volendo individuare tre parole rappresentative della Facoltà, si è innanzitutto scelto di puntare ai suoi tre filoni 'omogenei' Matematica, Fisica e Informatica, essendo le Scienze ambientali tipicamente interdisciplinari. Sono state quindi scelte rispettivamente le parole Numero, Tempo e Intelligenza.

Nell’ambito della matematica, il concetto di ‘numero’ è certamente tra i più antichi e immediatamente problematici, a causa della bivalenza dovuta all’uso del numero per ‘contare’ e del numero per ‘misurare’. Il sogno iniziale di un concetto di numero onnicomprensivo si scontrò ben presto con la constatazione che il sistema numerico dei pitagorici era inadeguato e la soluzione definitiva fu raggiunta solo nella seconda metà del XIX secolo con l’individuazione del sistema dei numeri reali.

Fra i descrittori in ambito fisico, l’elaborazione di un concetto di ‘tempo’ interpersonale e verificabile, non psicologico e puramente personale, è operazione tra le più complesse. In effetti il tempo in fisica è essenzialmente un tessuto di correlazioni, soggetto quindi anche ad evolversi a mano a mano che avanzano le conoscenze nei vari settori della fisica stessa.

Lo sviluppo delle capacità di elaborazione dei calcolatori ha consentito, nel corso degli anni, di implementare procedure via via sempre più complesse. La circostanza ha finito con il confrontarsi con la questione, antica e sempre attuale, se l’uomo stesso non sia, nei suoi comportamenti, essenzialmente ‘procedurale’. La distinzione (o non distinzione) fra uomo e macchina (tipicamente, il calcolatore) è quindi questione destinata a diventare sempre più centrale e un naturale terreno di confronto è costituito dalla ‘intelligenza’, intesa nelle sue varie accezioni.

RINGRAZIAMENTI

I contributi relativi alle tre parole sono il risultato del lavoro di più persone. La parte sulla parola Numero è stata elaborata da alcuni matematici della Facoltà con il contributo della collega Elena Zizioli, la parte sulla parola Tempo ha visto l'impegno di fisici della Facoltà, per la parola Intelligenza si sono impegnati alcuni informatici della Facoltà. Si ringraziano quindi tutte le persone che hanno in vario modo contribuito al risultato finale.

Numero

Tutto è numero

> *Die Zahlen sind freie Schoepfungen des menschlichen Geistes, sie dienen als ein Mittel, um die Verschiedenheit der Dinge leichter und schaerfer aufzufassen.* I numeri sono libere creazioni dell'intelletto umano, essi servono per afferrare più facilmente e più nettamente la diversità delle cose.
>
> R. DEDEKIND, *Was sind und was sollen die Zahlen?* Braunschweig 1887, S. III

Perseverance si è posata su Marte e ha cominciato a percorrerne il suolo per aiutarci a rispondere ad alcune delle nostre domande. Non possiamo fare a meno di porci problemi e forgiarci immagini della realtà, siamo «animali simbolici» (Cassirer). Che cosa si cela dietro un tale successo? Una tecnologia straordinaria e una altrettanto straordinaria potenza di calcolo. Ma a monte di queste ci sono le teorie («Niente è più pratico di una buona teoria», affermava Boltzmann): in particolare la meccanica celeste, che ha avuto origine con Newton; ma, ancora, dietro a quest'ultima, ci sono le *Coniche* di Apollonio. E prima di

Apollonio, Euclide e Archimede. Il concetto chiave degli *Elementi* di Euclide (che rimanda alle ricerche di Eudosso) è quello di *rapporto* di grandezze omogenee ('archimedee') e, sorprendentemente, non è esplicitamente definito (ma solo vagamente descritto) e risulta così *primitivo*; per contro la definizione di *proporzione*, ovvero l'uguaglianza di due rapporti, è esplicita e operativa ma estremamente sottile, tanto da venire recuperata nello spirito solo più di due millenni dopo dalla teoria delle *sezioni* di Dedekind, che aprì la strada, assieme alla contemporanea teoria di Cantor, al concetto moderno di *numero reale*.

Dal numero si parte: «Dio ha creato i numeri naturali, tutto il resto è opera dell'uomo» (Kronecker).

Uno scritto sul 'numero' può sembrare scontato, noioso, invece vogliamo renderlo una storia viva che parla di un filone della matematica che ha la proprietà di attraversare tutti gli altri. È una storia che parte dalle idee più semplici di questa disciplina, per arrivare alle più complesse, passando attraverso i più svariati impieghi in ogni tipo di Scienza.

Usiamo ogni giorno la parola 'numero' sia nei testi scritti che nelle frasi del parlato, forse anche un numero (!) maggiore di volte di quanto ci rendiamo realmente conto. I ricercatori della casa editrice britannica Oxford University Press hanno collezionato una vasta quantità di testi scritti in inglese, e hanno analizzato le parole che vi compaiono più di frequente. Tra di esse, la parola 'numero' (o, per meglio dire, la sua corrispondente inglese 'number') rientra nella top 25 dei sostantivi più utilizzati, classificandosi in 22esima posizione.

Così come è una parola comune nel linguaggio quotidiano, 'numero' è a maggior ragione una parola molto usata nelle discipline scientifiche, e in particolare in matematica. Non c'è dunque da stupirsi che la parola 'numero' compaia esplicitamente nel titolo stesso di ben due degli otto settori in cui la matematica viene suddivisa nella classificazione bibliografica proposta da Dewey nel 1876. I nomi di questi due settori sono Teoria dei numeri e Analisi numerica.

Chiediamoci, che cosa vuol dire tale parola? Innanzitutto la parola 'numero' viene dal latino *numerus-i*, mentre il termine greco corrispondente è *arithmós*. E qual è l'origine della parola latina? È abbastanza accertata la derivazione dalla radice indoeuropea *nem-*, che significa «distribuire, assegnare, devolvere»; il concetto di numero potrebbe appunto nascere dall'idea di misurare, di regolare, una distribuzione. Tra l'altro, per i latini il plurale 'numeri' significava non solo aritmetica ma anche astronomia.

Dovrebbe esistere una scienza generale che spieghi tutto quello che si può conoscere *sull'ordine e sulla misura*, considerate indipendentemente da ogni applicazione ad un particolare soggetto… e invero questa scienza ha un nome proprio, consacrato da un lungo uso, vale a dire: *Matematica*. (Cartesio, 1628)

La duplice esperienza del numero quale strumento per *contare* e *misurare* è comune a tutte le culture. Simboli per i numeri si possono rinvenire nei più antichi resti di scrittura umana, fin dall'età della pietra. I primi sistemi numerici, che segnano l'inizio dell'aritmetica, risalgono alle antichissime civiltà che fiorirono nella valle del Nilo, del Tigri e dell'Eufrate. Ma mentre gli egiziani e soprattutto i babilonesi si accontentano di sviluppare sofisticate tecniche numeriche, solo con i Greci si fa strada l'idea di conoscenza astratta, perseguita per sé stessa, e, in particolare, nasce la *matematica* («le cose da imparare») come scienza. I Pitagorici (VI sec. a.C.) furono subito interessati al significato filosofico di numero: per loro l'intero universo era caratterizzato dai numeri, dai loro rapporti e dalle reciproche relazioni. Il celebre motto della scuola pitagorica «tutto è numero» esprime icasticamente l'esigenza di poter descrivere il mondo attraverso le sue regolarità, attraverso *rapporti.*

Per Pitagora, tra l'altro genitore del termine *matematica*, i numeri erano quelli naturali e quelli che si potevano esprimere come loro rapporti. Il grande filosofo creava quindi un legame tra 'numero' e 'razionale', per cui potremmo interpretare il detto come «tutto è razionale», ovvero «tutto è rapporto».

I Pitagorici per primi si applicarono alle matematiche e le fecero progredire, e, nutriti delle medesime, credettero che i principi di queste fossero principi di tutti gli esseri. E, poiché nelle matematiche i numeri sono per loro natura i principi primi (…) e inoltre poiché vedevano che le note e gli accordi musicali consistevano nei numeri; e, infine, poiché tutte le altre cose, in tutta la realtà, parevano a loro che fossero fatte a immagine dei numeri e che i numeri fossero ciò che è primo in tutta quanta la realtà, pensarono che gli elementi del numero fossero elementi di tutte le cose, e che tutto quanto l'universo fosse armonia e numero. (Aristotele, *Metafisica*, A5, 985 b 23-986 a 3)

Nel confortante mondo razionale di Pitagora non c'era posto per numeri 'deviati', per cui possiamo immaginarne lo scoramento quando l'allievo Ippaso dimostrò che il lato e la diagonale di uno stesso quadrato non potevano avere entrambi lunghezza esprimibile con un numero razionale.

La leggenda narra che Pitagora condannò a morte Ippaso, sperando forse che quel piccolo incidente di percorso non intaccasse il suo mondo. Non andò così. La storia ci insegna che il peggiore incubo di Pitagora è diventato una realtà, che è anzi più sorprendente di quanto egli potesse immaginare: non solo i numeri irrazionali sono infiniti, ma addirittura si scoprirà (dopo duemila quattrocento anni… con Georg Cantor e l'*aritmetica transfinita*)[1] che ce ne sono 'di più' dei razionali stessi.

La scoperta dell'*incommensurabilità* (assenza di una misura comune) del lato e della diagonale di un quadrato conduce ai rapporti *irrazionali* ('*logos* àlogos').

Il vertice di astrazione è raggiunto nel V libro degli *Elementi* di Euclide (fine IV sec. a.C.), dedicato alla *teoria delle proporzioni*, che verrà recuperata nello spirito solo più di due millenni dopo dalla teoria delle *sezioni* di Richard Dedekind (1872). Ma un esame anche sommario delle opere di Euclide, Archimede e Apollonio, solo per citare i più illustri matematici ellenistici, mostra tutta l'eleganza e la forza dell'arsenale geometrico classico scaturito dalla teoria delle proporzioni. L'*algoritmo euclideo* porta ad approssimazioni razionali via via più precise di un qualsiasi numero reale (e il tutto si può formalizzare

---

[1] Riferendosi agli studi sull'infinito e all'aritmetica transfinita di Cantor, David Hilbert ebbe a dire: «Nessuno potrà cacciarci dal paradiso che Cantor ha creato per noi» (*Über das Unendliche. Mathematische Annalen*, 1926).

tramite il geniale concetto di *frazione continua*, dovuto a P.A. Cataldi, 1613). Ne emerge una sorta di rappresentazione dicotomica di numero sia come *ente* (Parmenide) sia come *algoritmo* (Eraclito), che ha valenza generale, come fu acutamente notato dal grande filosofo K.R. Popper (1902-1994). In particolare, la ritroviamo, nella matematica contemporanea, nella tensione tra *strutture astratte* e *tecniche dimostrative* e *algoritmi di calcolo.*

Come nasce la *definizione di numero*? Euclide nel VII libro degli *Elementi* lo definisce come «la moltitudine formata da unità», avendo precedentemente definito l'unità come «ciò in virtù di cui ogni cosa esistente è chiamata uno»; si trova un'eco di questa definizione in quella cantoriana di *numero cardinale*, come «insieme costituito da nient'altro che unità». Dato che un'unità non è composta da unità, né Euclide né Aristotele riguardarono l'unità come un numero, ma piuttosto come «la base del contare», o come «l'origine del numero».

I Greci dunque riguardavano come numeri solamente i numeri naturali, escludendo l'unità, le frazioni venivano trattate come rapporti di numeri e i numeri irrazionali come relazioni tra grandezze incommensurabili in geometria. A questo proposito, osserviamo che *Euclide non usa i numeri nella sua geometria*: parla per esempio di *uguaglianza di segmenti* e di una nozione di *addizione di segmenti*, ma non menziona la lunghezza di un segmento; quando arriva all'area, malgrado non dica esplicitamente che cosa intenda per uguaglianza di aree, noi possiamo inferire dalle sue dimostrazioni che intenda una nozione determinata dal *suddividere le figure in parti* e *dall'addi-*

zionare o sottrarre figure congruenti. Non usa alcun numero per misurare l'area di un triangolo, e analogamente qualcuno potrebbe sorprendersi notando che il famoso Teorema di Pitagora non asserisce che «il quadrato della lunghezza dell'ipotenusa (un numero) è uguale alla somma dei quadrati delle lunghezze dei due cateti di un triangolo rettangolo», ma piuttosto che «l'area del quadrato costruito sull'ipotenusa è uguale all'area formata dall'unione dei due quadrati costruiti sui cateti».

L'assenza di numeri può sembrare curiosa al lettore dei nostri tempi, in cui i numeri reali sono onnipotenti, un segmento è misurato dalla sua lunghezza (un numero reale) e un'area da un certo integrale… Questo uso dei numeri reali, a livello fondazionale, è lontano dallo spirito di Euclide. Chiediamoci allora: *che ruolo giocano i numeri nello sviluppo della geometria*?

Per rispondere a questa domanda, possiamo considerare la moderna *struttura algebrica di campo* (che potrebbero essere per esempio i numeri reali, ma non solo!), e mostrare che il piano cartesiano formato dalle coppie ordinate di elementi del campo forma una geometria che soddisfa agli assiomi di Euclide. Ma una più profonda riflessione mostra che la nozione di numero appare intrinsecamente nella geometria, dato che si può definire in modo puramente geometrico una aritmetica dei segmenti: si possono addizionare e moltiplicare opportunamente due segmenti, ottenendo un nuovo segmento. Queste operazioni soddisfano le usuali proprietà associativa, commutativa, distributiva… in modo da ottenere un campo ordinato, i cui elementi positivi sono le classi di equivalenza di segmenti congruenti. In questo modo, si stabilisce una *connessione tra la geometria astratta introdotta assiomaticamente e i metodi dell'algebra moderna*.

In più, possiamo dire che un approfondito studio delle proprietà algebriche e di ordinamento del campo associato ad una geometria definita da determinati assiomi, aiuta a capire e a risolvere diversi problemi della geometria classica, gettando luce sul significato più profondo e sottile delle proprietà geometriche coinvolte.

In sostanza, le idee presenti nel processo del 'contare' furono tradotte nel corso dei secoli in sistemi di assiomi, via via sempre più perfezionati, fino ad utilizzare i concetti della teoria degli insiemi con i metodi introdotti da Dedekind.

Nella costruzione passo dopo passo del sistema dei numeri ricorrono costantemente certi temi:

1) il passaggio da uno stadio al successivo è ogni volta stimolato dal desiderio di risolvere problemi che possono essere formulati ma non risolti con i numeri costruiti fino a quel momento;

2) il sistema numerico è costruito, a ciascun passaggio, come un'estensione del sistema esistente, così come le operazioni e le relazioni preesistenti devono essere mantenute nel nuovo sistema;

3) infine va verificata la validità di tutte le regole computazionali nel nuovo sistema.

Così avviene che l'insieme dei numeri naturali sia chiuso rispetto ad addizione e moltiplicazione, e ciascuna delle due operazioni abbia un elemento neutro, cioè un numero che sommato/moltiplicato ad un qualsiasi altro numero non lo cambia: lo zero per l'addizione e l'uno per la moltiplicazione. Altro non si può dire, ad esempio non si può 'tornare indietro': se allo zero sommo un numero (diciamo il cinque), poi non esiste un altro numero naturale che posso sommare al cinque per ottenere lo zero. Passando dai naturali agli interi si ovvia a questo problema: lì infatti troviamo il -5, che sommato al 5 di partenza dà 0. I numeri interi hanno più struttura dei naturali: essi costituiscono quello che viene chiamato un *gruppo* rispetto all'addizione, e un *anello* rispetto alle due operazioni. Permane però lo stesso problema con la moltiplicazione: per quale numero posso moltiplicare 2, in modo da ottenere l'elemento neutro della moltiplicazione, cioè 1? Da qui l'estensione successiva ai numeri razionali, che costituiscono un *campo*: sostanzialmente, un insieme nel quale possiamo svolgere tutte e quattro le operazioni ordinarie (le operazioni 'razionali').

Dalla scoperta degli irrazionali, come abbiamo visto dovuta ai pitagorici, attraverso diversi tentativi filosofici e matematici si arriva poi fino all'estensione dai razionali ai reali, tramite le *sezioni di Dedekind.* Un altro metodo per costruire i numeri reali come 'completamento' del sistema dei numeri razionali è quello delle *successioni fondamentali di Cantor*: questo metodo aveva radici più recenti, ma la procedura si dimostrò molto fruttuosa in seguito, nella teoria degli anelli di valutazione, degli spazi metrici e degli spazi topologici, tutte strutture che possono essere completate esattamente nello stesso modo. Il terzo tipo di approccio ai numeri reali fu quello di Karl

Weierstrass (di alcuni anni più anziano di Dedekind e di Cantor), basato sull'idea, risalente all'antichità, di racchiudere un numero il cui valore esatto non si determina facilmente, all'interno di intervalli razionali sempre più piccoli, idea che ha tuttora applicazione nella stima degli errori in ambito computazionale.

I numeri reali sono un campo ordinato e continuo, e riempiono (nel senso che possono essere messi in corrispondenza biunivoca con i punti di) una retta, per cui sembra che non ci sia più spazio per altri numeri. Ma nel Rinascimento si presentò un dilemma ai matematici (italiani!): per affrontare certi problemi di algebra, occorreva la radice quadrata del numero -1, però andava contro il loro raziocinio ammettere nella famiglia dei numeri questa entità 'immaginaria'. Dovettero passare 300 anni da questa scoperta fino a che, con Carl Friedrich Gauss, i *numeri complessi* venissero capiti e accettati dai matematici: essi compresero che la radice quadrata di -1 può essere combinata coi numeri reali, dando luogo ad un nuovo più grande insieme di numeri, che obbediscono ancora alle solite regole dell'aritmetica e dell'algebra; tali numeri possono inoltre essere rappresentati dai punti del piano reale e la cosa più bella è che le loro stesse operazioni si traducono esattamente nelle isometrie e nelle similitudini del piano euclideo reale: *i numeri complessi rappresentano completamente, con le loro operazioni, la geometria del piano euclideo, con le sue trasformazioni*, così come *i numeri reali rappresentano completamente, con le loro operazioni, la geometria della retta euclidea, con le sue trasformazioni* (traslazioni e omotetie).

Lo studio dei numeri complessi e delle funzioni di una o più variabili complesse costituisce quella che viene chiamata *analisi complessa.* Oggi l'analisi complessa è uno strumento d'uso universale, sia in matematica pura che nelle applicazioni alla fisica, all'ingegneria e alla scienza in generale; essa è la chiave per lo studio dei numeri primi: in particolare, la teoria delle funzioni *olomorfe* ('di forma perfetta') si intreccia strettamente con le proprietà dei numeri primi (*funzione zeta* di Riemann e relativa *ipotesi* sulla distribuzione dei suoi zeri nel campo complesso, a tutt'oggi non dimostrata). L'analisi complessa è applicata inoltre a svariati problemi di aeronautica, d'idrodinamica, di disegno di circuiti elettronici, ed in molti altri campi.

«I numeri complessi rendono possibile l'impossibile». Se poi, seguendo il modello fornito dai numeri complessi, che formano uno spazio vettoriale 2-dimensionale sui reali, si cerca di far diventare anche gli spazi vettoriali reali di dimensioni maggiori una sorta di sistemi numerici '*ipercomplessi*', allora, o si permettono anche dimensioni infinite, o si deve rinunciare a qualcuna delle proprietà familiari delle operazioni, come la commutatività o l'associatività della moltiplicazione.

Nel 1843 furono scoperte una dopo l'altra l'algebra 4-dimensionale dei *quaternioni* (da Sir William Rowan Hamilton), un corpo non commutativo, e quella 8-dimensionale degli *ottonioni* (da John T. Graves, amico di Hamilton, e dopo due anni, indipendentemente, da Arthur Cayley), in cui viene a mancare, oltre alla commutativa, anche la proprietà associativa della moltiplicazione. Proprio come i numeri complessi permettono di descrivere la geometria euclidea del piano in un modo spesso sorprendentemente semplice, così i *quaternioni si applicano alla descrizione della geometria euclidea 3- e 4-dimensionale*.

In particolare, i quaternioni trovano un'importante applicazione nella modellizzazione delle rotazioni dello spazio tridimensionale: per questo motivo essi sono ampiamente usati nella fisica teorica (nella teoria della relatività e nella meccanica quantistica) e in settori più applicati, come la computer grafica 3D e la robotica (per individuare la posizione spaziale dei bracci meccanici a più snodi). Ma, ancora una volta, le invenzioni di questi nuovi e fruttuosi, pur se rivoluzionari, sistemi numerici non furono determinate da necessità pratiche applicative, bensì stimolate dalla ricerca di analogie e dal desiderio di costruire strutture più ampie e generali, soddisfacenti a quei criteri di logicità, di simmetria, di pura bellezza, che da sempre sono alla base delle creazioni del pensiero matematico.

I numeri complessi, i quaternioni, gli ottonioni, sono tutte estensioni del campo reale, in cui si perde un'altra importante proprietà di cui esso gode: l'esistenza di un ordinamento totale, per cui dati due numeri si possa sempre dire se uno è minore, uguale o maggiore dell'altro, e che in più sia compatibile con le operazioni.

Si può però pensare ad *altre possibili estensioni del campo reale*, non più algebriche come quella costituita dai complessi (commutativa) o dai quaternioni (non commutativa), ma *che diano luogo ancora a campi e permettano ancora un ordinamento che ne rispetti le opera-*

zioni: parliamo di estensioni trascendenti, con cui si ottengono campi che sono spazi vettoriali di dimensione infinita sui reali (come i *campi di funzioni razionali* o di *serie di Laurent*). Questi campi possono essere *ordinati in modo non archimedeo*, ovvero qui è possibile trovare coppie di numeri tali che uno dei due non sia raggiungibile da alcun multiplo intero dell'altro.

Ci sono altri esempi di campi che contengono propriamente i reali, che sono ancora totalmente ordinati, ma non archimedei. Citiamo in particolare i *numeri surreali*, introdotti dal grande matematico e divulgatore John H. Conway (1937-2020). In questo insieme troviamo i numeri reali, gli infinitesimi (i famosi epsilon, cioè quantità più piccole in valore assoluto di qualsiasi numero reale) e gli infiniti, ottenuti come i reciproci degli infinitesimi.

Ma proviamo a chiederci che cosa avviene in un piano (o in uno spazio geometrico) i cui punti siano coordinatizzati da un campo con questa 'strana' caratteristica, cioè di avere un ordinamento non archimedeo, chiediamoci che fenomeni possono verificarsi nelle cosiddette *geometrie non archimedee.*

La versione geometrica del principio di Archimede, affermante che «dati due segmenti esiste almeno un multiplo intero del primo che supera il secondo», è talmente radicata nella nostra esperienza del mondo, che è veramente difficile immaginare una geometria in cui questo non si verifichi. Anche la stella più lontana ha una distanza dalla Terra che può essere misurata in anni-luce, e anche se prendiamo il metro come unità di lunghezza, riusciamo a determinare un certo numero di metri, pur se molto grande, che supera la distanza di quella stella lontanissima. In una geometria non archimedea, esistono segmenti *finiti*, cioè tali che la misura della loro lunghezza sia minore di qualche numero naturale, segmenti *infiniti*, tali cioè che non esista alcun numero naturale che li limiti, e segmenti *infinitesimi*, tali che la misura della loro lunghezza sia minore del reciproco di qualsiasi numero naturale…

Finché restiamo ancorati all'idea che la geometria in qualche modo rappresenti il mondo reale, simo costretti ad accettare per vero il principio di Archimede. D'altra parte, in matematica astratta, una geometria è solamente una costruzione teorica che soddisfa ad un certo insieme di assiomi. Occorre che liberiamo le nostre menti per poter immaginare una geometria non archimedea, allo stesso modo di quando abbiamo accettato e compreso a fondo le geometrie non euclidee.

To help visualize a non-Archimedean geometry, let us imagine for a moment that we live in a non-Archimedean universe. What we perceive with our telescopes are very large, but still finite, distances; what we observe with our cyclotrons and particle accelerators are very small, but still finite, quantities. And yet out beyond the farthest stars are other parallel universes, and inside each elementary particle are infinitesimal worlds unknown to us. Perhaps they exert some subliminal influence on our lives? How could we determine whether our universe is indeed non-Archimedean when we see only the finite part of it? (R. Hartshorne, *Geometry, Euclid and beyond*, p. 161)

La costruzione di un altro esempio di estensione non archimedea dei numeri reali trova le sue origini in un particolare approccio al calcolo infinitesimale e differenziale.

L'introduzione del *calcolo infinitesimale* nel XVII secolo (anche qui, di nuovo dualmente incarnato in modo *geometrico-dinamico* (Newton) e *algebrico-statico* (Leibniz) segna l'affrancamento dall'eredità classica, pur affondando le sue radici nella matematica di Archimede, e faticò non poco, in virtù del suo ambire alla massima generalità, a raggiungere standard di rigore paragonabili a quelli antichi. La prodigiosa versatilità del calcolo differenziale fa mettere da parte la problematicità delle sue fondamenta ed indirizza verso la maggiore estensione possibile dei campi di applicazione: «Allez de l'avant, la foi vous viendra» (D'Alembert), sforzi premiati dai meravigliosi progressi nella matematica pura e nella descrizione matematica della natura. Ma non tarda a manifestarsi anche un'esigenza critica che, ad esempio, porta alla moderna definizione di limite (Cauchy, Weierstrass), fortemente ispirata all'approccio euclideo. Il perno di tale movimento è l'*analisi critica delle dimostrazioni* (I. Lakatos), che porta ad esplicitare via via 'lemmi nascosti' e assunzioni problematiche. Il punto di arrivo è quello dalla matematica come *sistema ipotetico-deduttivo* (Hilbert): una teoria è descritta da un insieme di *assiomi* (o postulati) indipendenti da cui si derivano, per inferenza logica, i *teoremi*.

In quest'ordine di idee si può collocare la moderna *analisi non standard* che ha costruito rigorosamente gli infinitesimi di Leibniz (risultato di tipo *parmenideo*) giustificando con ciò anche l'uso spregiudicato che tuttora se ne fa in moltissimi campi, motivato dall'enorme carica intuitiva del concetto: si pensi solo al cosiddetto *calcolo di Cartan* in geometria differenziale – che risulta cruciale anche nella formulazione delle moderne teorie fisiche, relatività, meccanica quantistica, teorie di gauge – impossibile da concepire senza un eccezionale intuito geometrico.

Strutture sempre più astratte vennero e vengono continuamente costruite, per moto interno o per rispondere a sfide intellettuali esterne. Come abbiamo descritto, a partire dal XIX secolo, i numeri (razionali, reali, complessi) vengono sussunti nel concetto generale di *campo* – assieme ad ulteriori astrazioni – e vengono ideate vieppiù nuove *geometrie* in cui si 'misura' (attraverso 'coordinate') per mezzo di questa struttura algebrica, e anche geometrie in cui… non si può misurare (!), come ad esempio i piani non desarguesiani, per i quali tale struttura coordinatizzante viene a mancare.

Ma, si può fare di più! Come abbiamo osservato, se si rinuncia a qualcuna delle proprietà che caratterizzano le operazioni di un campo, si ottengono ancora sistemi numerici, come i quaternioni, che costituiscono un corpo non commutativo, e gli ottonioni (algebra non associativa alternante); se poi si rinuncia ad ulteriori proprietà, allora si ha una proliferazione di sistemi numerici e una corrispondente proliferazione di svariati tipi di geometrie da essi coordinatizzate.

Razionali, reali, complessi, surreali sono esempi di campi infiniti, in quanto contengono infiniti elementi. In realtà esistono anche *campi finiti*, estremamente affascinanti e fucina di continue sorprese. Le usuali strutture geometriche, come rette, piani e spazi di dimensioni qualsiasi, le curve e le superfici, come coniche e quadriche ed ogni varietà, possono essere definite anche su campi finiti, oltre che sui numeri reali o complessi come siamo stati classicamente abituati. Che cosa cambia? Le rette, i piani e gli altri enti avranno un numero finito di punti e le relazioni tra essi potranno essere caratterizzate anche aritmeticamente. A prima vista può sembrare impossibile, ma qui è sotteso uno degli insegnamenti più importanti che la matematica può offrire: quello di privilegiare il ragionamento e di sfruttare le potenzialità della nostra mente, piuttosto che affidarsi alle sensazioni, che sono vincolate al nostro essere limitati.

Nelle *geometrie finite* molti risultati si possono ottenere con tecniche enumerative e combinatorie, o utilizzando tecniche algebriche di teoria dei gruppi, e numerose quanto sorprendenti ne sono le applicazioni: dalla costruzione di codici ottimali per le telecomunicazioni all'invenzione di raffinati quanto robusti sistemi crittografici per la sicurezza informatica.

Il fatto straordinario è che più le teorie divengono astratte, più sono in grado di farci comprendere la natura profondamente. E tale sforzo di comprensione non può e non potrà mai dirsi esaurito.

Qualità attraverso la quantità (ovvero, l'angelo della Topologia)

L'*analysis situs* (1895), ovvero la *topologia*, è stata creata dal *grand savant* francese Henri Poincaré. Essa costituisce un'estensione dell'*esprit de géométrie* che informa di sé tutto il resto della matematica. Due 'spazi topologici' sono considerati *omeomorfi* («della stessa forma») se possono essere «deformati con continuità» l'uno nell'altro (si perviene così ad una sorta di intuizione ‘spaziale’ di tipo qualitativo, scevra da aspetti metrici, allineamenti… quasi una «forma pura dell’intuizione sensibile» in senso kantiano). L’aggiramento del difficile problema generale di *distinguere* spazi topologici non omeomorfi ha condotto all’imponente sviluppo della *topologia algebrica*[2], basata sull’assegnazione sistematica (‘funtoriale’) di vari oggetti che risultano essere *gli stessi* per spazi omeomorfi. In particolare, questi possono essere *numeri*, come ad esempio il *genere* di una superficie chiusa orientabile: una *sfera* ha genere zero, un *toro* (ciambella) ha genere uno, due tori incollati assieme previa rimozione di due dischetti e un’opportuna identificazione dei bordi rimanenti hanno genere due e così via. Superfici di genere diverso *non possono essere omeomorfe* (ciò è intuitivamente ovvio ma richiede una dimostrazione). Il calcolo di vari *numeri*, ‘precipitati’ di architetture complicate risolve in molti casi il problema in questione, ed è rilevante nelle applicazioni fisiche *in primis*, ma anche in altri campi, tradizionali o emergenti.

La teoria dei numeri

I numeri naturali sono da sempre oggetto di studio per sé stessi. La moderna teoria dei numeri prende le mosse dalle *Disquisitiones arithmeticae*, capolavoro giovanile di C.F. Gauss (1777-1855), l’indiscusso *princeps mathemati-*

[2] Di questi tempi l’angelo della topologia e il demone dell’algebra astratta lottano per l’anima di ogni singola disciplina della matematica (Hermann Weyl 1885-1955).

corum dell'epoca e forse il più grande matematico di tutti i tempi (e a tutti gli effetti astronomo, cartografo, fisico) – che definì tale teoria «*regina della matematica*» – e rapidamente giunge a livelli eccelsi, stimolando la produzione di strumenti intellettuali fondamentali in altri campi della matematica, e da questi ultimi a sua volta stimolata. Citiamo di nuovo la teoria delle funzioni *olomorfe* che è strettamente connessa con le proprietà dei numeri primi (*funzione zeta* di Riemann). Il celeberrimo *ultimo teorema di Fermat,* dimostrato infine da Andrew Wiles (con un contributo di Robert Taylor in un punto cruciale) nel 1994-95 – un autentico *tour de force* – necessita della *geometria* (non euclidea: viene associata al problema una particolare curva algebrica piana – *curva ellittica modulare* – proveniente da un'opportuna 'tassellazione' del *piano iperbolico* completato da una 'retta all'infinito': si pensi, a mo' di analogia, alle varie versioni del *Cerchio limite* di Maurits Escher), dell'*algebra* (rappresentazioni di particolari *gruppi* di Galois: quest'ultimo è l'inventore dello stesso concetto di gruppo) e dell'*analisi* (*L-funzioni*, che generalizzano la zeta di Riemann). Questi sono solo alcuni esempi di un programma generale di unificazione delle varie branche della matematica (cui si sono aggiunti affascinanti legami con la fisica teorica) noto come *programma di Langlands*, tuttora in corso (una 'stele di Rosetta' per la matematica, come è stato anche definito). Infatti, i matematici, pur nella varietà e nell'autonomia dei vari settori, mirano a preservare l'unità di fondo della loro disciplina, poiché è solo questa tensione che riveste di senso l'intera impresa scientifica e garantisce l'applicabilità della stessa, anche se «l'irragionevole efficacia della matematica nelle scienze naturali» (Wigner) rimarrà per sempre un mistero.

La teoria dei gruppi e i numeri mostruosi

Nel corso dei secoli, come abbiamo visto, si sono pensati tanti insiemi con cui 'contare' e 'fare operazioni', con cui 'misurare' e descrivere l'infinita varietà del mondo. Con le strutture algebriche possiamo 'misurare' la simmetria degli oggetti, costruire codici sofisticati o sistemi crittografici che ci permettono di comunicare in modo sicuro, rappresentare le forze e gli altri sistemi fisici più complessi.

Una delle strutture algebriche fondamentali è quella di gruppo, un insieme con una operazione che gode della proprietà associativa, dell'esistenza di un elemento neutro e degli inversi. In modo per certi versi simile a quanto avviene per i numeri interi, che hanno nei numeri primi i loro costituenti fondamentali, in quanto ogni numero intero si può ottenere moltiplicando tra loro numeri primi, anche per i gruppi esistono dei 'costituenti fondamentali', chiamati gruppi semplici, a partire dai quali si possono ottenere tutti gli altri. Uno dei maggiori successi della matematica del ventesimo secolo è il *Teorema di classificazione dei gruppi semplici finiti*, che ci fornisce la lista completa dei gruppi semplici con un numero finito di elementi, un analogo della tavola periodica di Mendeleev per la chimica. La dimostrazione di questo risultato ha coinvolto decine di studiosi durante tutto un secolo e si dipana attraverso una serie di articoli per un totale di circa quindicimila pagine. Nonostante tale importante risultato, tanti sono gli aspetti ancora da approfondire legati ai gruppi semplici, e tra questi quelli sicuramente più misteriosi e intriganti riguardano il gruppo semplice scoperto da Bernd Fisher e Robert Griess nel 1973, noto come *Mostro*, a causa delle sue impressionanti dimensioni (circa 8*10^53). I numeri che parametrizzano questo gigantesco insieme e ne descrivono le proprietà (per esempio il numero degli elementi e i fattori primi di tale numero) suggeriscono che c'è un legame, che ad ora rimane per lo più misterioso, tra aree della matematica e della fisica apparentemente distanti tra loro come la teoria dei gruppi, la geometria differenziale, la teoria dei numeri e la fisica quantistica.

Alla fine i numeri ritornano ad imporsi e ad affascinarci con le loro coincidenze, suggerendo rapporti e legami inaspettati.

Le applicazioni del numero

Parliamo dell'analisi numerica

Questo settore della matematica si occupa dello studio di algoritmi per risolvere in modo approssimato (ma accurato!) problemi complessi provenienti da altre discipline in matematica, fisica o ingegneria. Questi algoritmi non solo vengono studiati da un punto di vista matematico, ma vengono anche implementati in linguaggi di programmazione su un computer (dal portatile ai server di calcolo più performanti al mondo), in modo da risolvere problemi di complessità sempre crescente.

Ciascuno di noi, magari senza saperlo, ha usato un algoritmo di analisi numerica almeno una volta nella propria vita spostandosi (a piedi, in macchina, sul bus) da un luogo ad un altro e domandandosi quale fosse stata la propria velocità media. Nella sua versione più semplice, l'algoritmo che abbiamo utilizzato in tale occasione si basa su due dati (*input*): la distanza d tra i due luoghi, e il tempo t che abbiamo impiegato durante il tragitto. Il risultato (*output*) si basa su una semplice operazione, guidata dal significato fisico di velocità, che porta al calcolo $v = d/t$. Ci sarà però capitato durante il tragitto di fermarci per un semaforo rosso o di andare più velocemente in alcuni tratti piuttosto che altri: in tal caso è possibile ottenere una informazione più accurata suddividendo il percorso in più tratti intermedi. Guardando periodicamente il contapassi/contachilometri possiamo memorizzare le distanze intermedie $d_1, d_2, d_3, \ldots, d_n = d$ misurate a partire dal punto di partenza, e guardando in contemporanea l'orologio possiamo memorizzare i tempi di percorrenza $t_1, t_2, t_3, \ldots, t_n = t$ misurati cominciando dal momento in cui siamo partiti. Con questi dati, otterremo una approssimazione più dettagliata della velocità che abbiamo tenuto in ciascun tratto utilizzando l'algoritmo seguente

$$v_{12} = (d_2 - d_1)/(t_2 - t_1),\ v_{23} = (d_3 - d_2)/(t_3 - t_2) \text{ ecc.}$$

Per quanto semplice ed intuitivo, tale algoritmo è molto usato in svariati ambiti dell'analisi numerica, e prende il nome di *approssimazione alle differenze finite*.

Metodi alle differenze finite, e altri metodi collegati, sono fondamentali nell'approssimazione di equazioni differenziali, ad esempio provenienti dalla fisica matematica. Un caso molto famoso di questo tipo di problemi sono le equazioni di Navier-Stokes, utilizzate nella descrizione del moto di un fluido. Per esempio, si utilizzano algoritmi di analisi numerica per risolvere problemi di Navier-Stokes per simulare il moto del sangue all'interno delle arterie del corpo umano, o il moto dell'acqua in bacini di grosse dimensioni quali oceani, mari o laghi.

Diamo i numeri? La fisica matematica

Spesso a noi matematici, quando parliamo del nostro lavoro, capita di sentirsi dire «Che difficile!» e alla nostra risposta spontanea «Io non lo trovo difficile!» ecco che si vede comparire sul viso dell'interlocutore la tipica espressione da… «sta dando i numeri questo qua?», che probabilmente è la stessa faccia che aveva a scuola durante la lezione di matematica mentre il professore era alla lavagna. E quante volte a noi stessi è uscita quell'espressione incredula mentre studiavamo matematica da studenti: ma il motivo per noi era che si rimaneva estasiati da come si comporta questa materia e quanto può fare e quanto sono belle ed eleganti le sue costruzioni logiche!

È esaltante, della matematica, come si acquisiscano strumenti potentissimi studiando mattoncino dopo mattoncino ed è sempre sorprendente come questi strumenti possano aiutare a descrivere il mondo reale. Per esempio, nello studio (ed è giusto usare la parola studio perché quando si fa ricerca si deve riprendere in mano numerose volte la stessa equazione o la stessa teoria) della fisica matematica, in particolare della meccanica dei continui, si riescono a modellizzare tanti liquidi diversi e i materiali più svariati. In un corso di fluidodinamica si può imparare infatti che *esistono dei buoni modelli* (delle buone equazioni) per descrivere il comportamento di liquidi molto diversi: l'importante è usare l'appropriato valore numerico dei parametri.

Nella matematica applicata è importante declinare il concetto di numero nell'accezione di *quantità*. Infatti, dal punto di vista dei modelli matematici di situazioni reali è fondamentale quantificare i fenomeni, per capire la loro entità e prevedere come cambieranno al variare delle condizioni al contorno. Esiste per esempio un modello di fluido chiamato *Power-law* che, relativamente ad un esponente più piccolo di un certo numero-soglia, può descrivere il sangue, mentre se l'esponente supera il numero-soglia allora ci rappresenta certi tipi di liquidi industriali.

Si può sfruttare la teoria dell'elasticità per descrivere tanti diversi fenomeni, come per esempio il comportamento del tessuto scheletrico. Il muscolo viene modellizzato attraverso equazioni che contengono alcune valvole che possono essere modificate a seconda di quello che vogliamo studiare: c'è un parametro che indica quanto stimolo neuronale riceve il muscolo per contrarsi (è un numero percentuale) e altri numeri descrivono quanta forza ha perso il muscolo se è invecchiato.

Oppure potremmo trovarci nei panni di un oncologo che debba decidere la quantità di farmaco chemioterapico da somministrare a un paziente, valutandone i benefici e le controindicazioni. È chiaro che poco farmaco non avrebbe quasi sicuramente effetto, ma troppo farmaco causerebbe gravi danni collaterali: esiste una dose 'giusta'? E come calcolarla? Le equazioni costruite e studiate grazie alla matematica, se hanno la proprietà di descrivere in modo adeguato il fenomeno in oggetto, cioè se ne sono un 'buon modello', possono aiutarci a trovare risposte di tipo quantitativo, che sono le più difficili ma spesso le più utili.

E allora in matematica *diamo i numeri*? Sì, a volte sì... ma spesso *il valore di questi numeri è dettato dalla realtà*.

La ricerca operativa

Se per la risoluzione di problemi semplici è per lo più utile l'intuizione e il buon senso, per problemi più complessi un valido supporto viene fornito dalla ricerca operativa nota anche come teoria delle decisioni, o in inglese *Operational Research*. La ricerca operativa è una branca della matematica applicata in cui problemi decisionali complessi, detti anche problemi di ottimizzazione, vengono analizzati e risolti mediante modelli matematici e metodi quantitativi avanzati quali algoritmi esatti o approssimati. In tale disciplina i numeri permettono quindi di quantificare le decisioni ottimali di tipo continuo, intero o binario a seconda del contesto, i parametri e i vincoli del problema, al fine di raggiungere un determinato obiettivo, anch'esso rappresentato da un numero.

Sono quindi essenzialmente due le azioni che si compiono in questa disciplina quando si affronta un problema:

– la *rappresentazione del problema attraverso un modello matematico* che schematizzi le interrelazioni esistenti tra i diversi aspetti del fenomeno che si sta studiando tramite i numeri (valori di parametri);

– lo *sviluppo di algoritmi efficienti* per determinare una soluzione ottima del problema o una sua buona approssimazione, sempre espresse da numeri.

Il birapporto, ovvero l'insostenibile leggerezza della geometria proiettiva

La geometria proiettiva, teoria elegante e insieme potente fiorita nel XIX secolo, emerge dalla prospettiva («guida e porta», secondo Leonardo). Quest'ultima è indubitabilmente nata nell'antichità (si pensi agli affreschi del secondo stile pompeiano) ma la sua riscoperta moderna è attribuita al Brunelleschi e la sua sistemazione teorica è testimoniata dal *De Pictura* dell'Alberti e dal *De prospectiva pingendi* di Piero della Francesca («maestro d'abaco», ovvero matematico). Nella *Collezione matematica* di Pappo (III secolo) compare il concetto di *birapporto* («rapporto di due rapporti»), un numero individuato da quattro punti su di una retta. Questo numero risulta un *invariante proiettivo*: grosso modo, possiamo dire che da qualunque posizione si guardi la retta e si misurino le varie distanze *in scorcio*, ad esempio in una fotografia, esso rimane *invariato*. Le conseguenze di questo fatto sono di lunga portata: il birapporto è utilizzato non solo nella visione computazionale (calibrazione di videocamere) ma anche in campi apparentemente del tutto distanti, come la meccanica quantistica (nell'approccio geometrico) e la tomografia.

Epilogo

Tra le attività dello spirito umano, forse la matematica pura non ha rivali nel privilegio di essere, ed in così gran misura, *arte e scienza: un'arte fine a sé stessa, fecondissima di tangibili applicazioni* capaci di modificare le condizioni della vita umana, ma anche in grado di influenzare di rimbalzo l'ulteriore sviluppo dell'arte stessa.

Matematica e bellezza secondo sir M.F. Atiyah

Le verità matematiche sono nel nostro mondo. La nostra invenzione consiste nello scegliere tra tutte le possibili verità matematiche quelle che sono realmente interessanti. Ora, come e perché vediamo che qualcosa è interessante? Perché è bella, ha una bella struttura, produce emozione umana. Una macchina non può insegnarci a capire la bellezza. Newton disse che si sentiva come una persona che va in spiaggia e raccoglie un bel ciottolo. Ci sono milioni di sassi sulla spiaggia ma quale raccogli? Raccogli quello che vedi gradevole, lucido e bello e così tu scopri quel ciottolo, lo inventi. Quando scopri una verità matematica la stai in realtà inventando perché l'hai trovata e l'hai scelta perché è più bella delle altre. Pertanto, inventare è selezionare. Io scelgo cose che mi affascinano, come un artista. In musica ci sono tutte le note che si possono scrivere. Perché dovrei sceglierne alcune? Ci sono milioni di possibilità. Prenderne alcune è comporre, è inventare; noi consideriamo tutto questo come invenzione. Tutte le possibilità sono lì. Inventare una sinfonia è una creazione umana. Qual è la differenza tra creare un bel brano di musica e creare un bel teorema matematico? Io penso che sia la stessa cosa.

Bibliografia

A. Ash - R. Gross, *Elliptic Tales. Curves, counting and Number Theory*, Princeton University Press, Princeton-Oxford 2012.
R. Betti, *Geometria leggera. Introduzione all'idea di spazio matematico*, FrancoAngeli, Milano 2015.
H.D. Ebbinghaus et al., *Numbers*, Springer, New York 1991.
Euclide, *Tutte le opere*, a cura di F. Acerbi, Bompiani, Milano 2007.
R. Hartshorne, *Geometry: Euclid and beyond*, Springer, New York 2000.
J. Stillwell, *Da Pitagora a Turing. Elementi di filosofia della matematica*, a cura di R. Lupacchini, Edizioni ETS, Pisa 2018.
P. Zellini, *La ribellione del numero,* Adelphi, Milano 1985.

Tempo

Ogni evento ha il suo tempo sotto il cielo (Qo *3,1-11)*

Il tempo e la sua complessità concettuale hanno una tradizione filosofica antica che, per quanto riguarda il tema trattato in queste pagine, viene sintetizzata in Newton e Galileo. E le domande fondamentali sono quelle che gli uomini si pongono da sempre. Potrebbero un giorno le cose, dovunque si trovino, fermarsi improvvisamente? Gli uccelli congelarsi a metà volo, le persone a metà frase e i pianeti e le particelle subatomiche bloccarsi a metà orbita?

Se tutto ciò non fosse possibile, allora bisognerebbe ammettere che il tempo non è indipendente dagli eventi che accadono e che quindi tutti i discorsi sul tempo dovrebbero, in qualche modo, essere collegati a relazioni temporali tra cose ed eventi. Se tutto ciò accadesse, invece, allora no, questo vorrebbe dire che esiste un tempo senza cambiamento e che il tempo sarebbe, in un certo senso, importante indipendentemente dagli eventi nel tempo.

Newton, insieme a Platone, era fermamente convinto che il tempo fosse come un contenitore vuoto in cui si possono collocare cose ed eventi, un contenitore però indipendente da ciò che vi è collocato all'interno. Nei *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, nello Scolio, subito dopo le Definizioni, introduce il tempo assoluto: «Il tempo assoluto, vero, matematico, in sé e per sua natura senza relazione ad alcunché di esterno, scorre uniformemente, e con altro nome è chiamato durata; quello relativo, apparente e volgare, è una misura (esatta o inesatta) sensibile ed esterna della durata per mezzo del moto, che comunemente viene impiegata al posto del vero tempo: tali sono l'ora, il giorno, il mese, l'anno».

Il tempo assoluto è, per Newton, un ente fisico unidimensionale, che fluisce uniformemente ed indipendentemente dai fenomeni naturali e dal loro stato di quiete o di moto della sede in cui essi si svolgono. Tale ente fisico, proprio perché 'scollato' dagli eventi, permette di stabilire senza ambiguità se due eventi sono simultanei oppure uno di essi precede o segue l'altro e di quantificare la durata di un fenomeno, intesa come intervallo temporale che separa due eventi.

Questa visione del tempo finisce quindi per coinvolgere anche quella di spazio e movimento. Se sei un *sostanzialista* del tempo, sosterrai la nozione di spazio e di movimento assoluto, dove il movimento assoluto diventa il movimento relativo allo spazio e al tempo assoluti. Se sei *relazionista* dello spazio e del tempo, allora devi essere anche un relazionista del movimento, tutto il movimento è cioè movimento relativo a qualcosa.

Cosa sono allora per Newton i moti relativi? Nel Corollario alla prima legge della dinamica, che recita: «Ciascun corpo persevera nel proprio stato di quiete o di moto rettilineo uniforme, salvo che sia costretto a mutare quello stato da forze impresse», Newton chiarisce cosa siano i moti relativi: «I moti relativi dei corpi inclusi in dato spazio sono identici sia che quello spazio giaccia in quiete, sia che il medesimo si muova in linea retta senza moto circolare».

Qui il riferimento è al famoso «gran navilio» di Galileo, che parlando del carico «sotto coverta», di mosche, farfalle e pescetti, di persone che saltano verso poppa e verso prua, di «stille cadenti» in vasi di «angusta bocca», conclude che « (…) voi non riconoscerete una minima mutazione in tutti li nominati effetti; né da alcuno di quelli potrete comprendere se la nave cammina, o pure sta ferma».

Benché il concetto di Sistema di Riferimento e, in particolare, di Sistema di Riferimento Inerziale faccia parte di una ri-lettura post-newtoniana della meccanica, per Galileo non poter comprendere se la nave cammina oppure sta ferma apre semplicemente all'idea di sistemi equivalenti, i sistemi di riferimento inerziali, in moto relativo rettilineo e uniforme, che sono fra loro indistinguibili per le leggi della meccanica. In questa visione, lo spazio di Galileo è 'non relativo', non perché assoluto ma perché invariante per le leggi della fisica.

Lo spazio e il tempo di Newton, invece, sono unici e assoluti. Una visione questa che va sicuramente letta alla luce delle conoscenze astronomiche del tempo. Copernico, Galileo e Keplero vedevano il sistema costituito dal sole e dai pianeti muoversi sullo sfondo delle stelle fisse. Il fatto che le stelle non fossero soggette ad alcun movimento, almeno a quanto appariva agli osservatori del tempo, suggeriva che potesse esistere uno spazio privilegiato, che resta però inaccessibile alle osservazioni dell'uomo.

In modo analogo, la misura del tempo era affidata alla ripetizione di fenomeni che appaiono come periodici e uniformi, Newton fa esplicitamente riferimento all''horologium oscillatorium' di Huygens ed al fenomeno periodico delle eclissi dei satelliti di Giove.

Per Newton, le misure temporali o spaziali eseguite dall'uomo sono 'volgari' perché approssimazioni della misura di entità ideali e astratte di cui si postula l'esistenza, ma che sfuggono ai nostri sensi.

Tre secoli dopo, Mach, che criticò pesantemente il concetto di tempo e spazio assoluto ritenendoli una 'mostruosità concettuale', dovette riconoscere che si era trattato di un peccato solo veniale dal momento che di quelle «arbitrarie fantasticherie non ne fece alcun uso effettivo».

Nei *Principia*, infatti, Newton riesce a dare alla meccanica classica una lettura indipendente dall'esistenza o meno di uno spazio e di un tempo assoluto. E questo spiega perché ancora oggi la meccanica studiata a scuola sia quella newtoniana senza la necessità di parlare di tempo e spazio assoluto.

Un altro aspetto fondamentale del tempo della meccanica classica è l'apparente assenza di una direzione privilegiata, al contrario della nostra esperienza che invece *sente* la unidirezionalità del tempo. I fenomeni naturali, infatti, sono caratterizzati da una direzione temporale privilegiata. Se immergiamo un corpo caldo all'interno di un recipiente contenente acqua fredda dopo un certo tempo osserviamo che l'acqua si è riscaldata mentre il corpo si è raffreddato.

Dal punto di vista fisico questo corrisponde ad un passaggio di energia (calore) dal corpo caldo a quello freddo sino al raggiungimento dell'equilibrio termico segnalato da una identica temperatura.

Allo stesso modo una goccia di inchiostro lasciata cadere nell'acqua tenderà a spargersi in modo da colorare uniformemente l'acqua. Dopo un tempo sufficientemente lungo ogni piccola porzione di acqua colorata conterrà lo stesso quantitativo di acqua ed inchiostro. I fenomeni inversi o rovesciati temporalmente, ovvero il corpo caldo che si scalda ulteriormente o l'acqua colorata che ritorna goccia, non sono mai stati osservati in natura pur essendo perfettamente legittimi, ad esempio dal punto di vista della conservazione dell'energia.

Tali fenomeni che violano la naturale freccia del tempo, come in un film girato al contrario, sono perfettamente leciti anche dal punto di vista delle equazioni dinamiche che regolano il moto dei singoli costituenti, che per semplicità supponiamo essere le leggi della meccanica classica o leggi di Newton.

Tali equazioni, che dovrebbero essere alla base della descrizione dei comportamenti dei fenomeni naturali, prevedono che anche il moto rovesciato temporalmente sia ugualmente possibile. Resta dunque da capire perchè tali fenomeni non siano mai stati (e mai lo saranno) osservati.

Un primo tentativo di dare una risposta a questo 'increscioso contrattempo' fu fornito da Boltzmann, il quale cercò di caratterizzare tali eventi come altamente improbabili, introducendo così i concetti probabilistici, oggigiorno così diffusi nella scienza, anche nell'ambito della perfettamente deterministica meccanica classica.

Anche il fastidioso teorema di ricorrenza di Poincaré, il quale afferma che un sistema isolato, soggetto alle equazioni di Newton, ritorna arbitrariamente vicino alla condizione iniziale pur di aspettare un tempo sufficientemente lungo (e quindi la goccia ritorna goccia dopo essersi mescolata nell'acqua), venne liquidato dicendo che tale tempo sarebbe estremamente più lungo dell'età dell'universo!

Una possibile spiegazione microscopica di questa unidirezionalità temporale è stata fornita negli ultimi decenni dalla teoria del caos. Le equazioni classiche che descrivono il comportamento microscopico dei singoli costituenti della materia, atomi o molecole, sono caratterizzate da quella che viene comunemente detta dipendenza sensibile (esponenziale) dalle condizioni iniziali.

Cosa significa tutto ciò in pratica? Significa che due condizioni iniziali che differiscono per una piccolissima differenza, da non poter nemmeno essere rilevata dai nostri strumenti di misura, col passare del tempo tendono a differenziarsi sempre più, originando traiettorie completamente differenti.

Parimenti, è sufficiente una piccolissima perturbazione, come appunto il battito di ali di una farfalla, a provocare una cambio repentino della traiettoria stessa. Ci si riferisce qui al cosiddetto 'effetto butterfly' che associa in modo paradossale il battito di ali di una farfalla in Cina allo scatenarsi di un tornado nel golfo del Messico.

Paradossi a parte, a causa delle inevitabili perturbazioni che ogni sistema subisce (nessun sistema può davvero considerarsi assolutamente isolato), la traiettoria 'invertita temporalmente' non potrà mai avvenire e l'evoluzione naturale tenderà sempre e inesorabilmente verso il suo stato di massima probabilità.

I concetti di irreversibilità possono avere conseguenze anche pratiche. Sulle superfici vediamo la realizzazione microscopica dei concetti della meccanica statistica. Potremmo dire la meccanica statistica in azione. Nell'immaginario collettivo una superficie di un materiale viene rappresentata con un piano di separazione perfetto e impenetrabile, invariabile nel tempo. La superficie di uno specchio, costruita generalmente con argento o alluminio, produce la nostra immagine riflessa e ci fa pensare a qualcosa di immutabile.

Questa mancanza di variazione viene inconsciamente dal naturale paragone che facciamo con la nostra percezione dello scorrere del tempo. Tuttavia, esaminando questi sistemi a scale inferiori a quella microscopica, dove arriviamo a distinguere il comportamento dei singoli atomi, vediamo come il tempo che determina il comportamento effettivo di questi sistemi assuma un ruolo fondamentale su una scala completamente diversa. Ed è con questa scala che dobbiamo confrontarci nel momento in cui vogliamo modificare le superfici e costruire su di esse nuovi sistemi con proprietà speciali controllando l'aggregazione degli atomi.

Consideriamo un centimetro quadrato di superficie di uno specchio di argento in contatto con l'aria. In condizioni normali di pressione e temperatura vi sono più di quattrocentomila miliardi di atomi di argento, e questa superficie è in contatto con un numero solo leggermente inferiore di molecole di aria. E le molecole di un gas sono libere di muoversi! Esse letteralmente colpiscono la superficie dell'argento, ed il numero di molecole che lo fanno in un secondo di tempo è maggiore di un milione di miliardi di miliardi. Questo significa che per coprire tutta la superficie dello specchio con un singolo strato di molecole, l'aria impiega un centomillesimo di secondo. Come possiamo quindi pensare di costruire su una superficie un nuovo sistema la cui dimensione sia di pochi nanometri (un nanometro = un miliardesimo di metro) fatto per esempio da atomi di metallo? È necessario dilatare il tempo che le molecole di aria impiegano a coprire la superficie, e ciò viene reso possibile grazie alla diminuzione della densità delle molecole che si trovano al di sopra di ogni centimetro quadrato di superficie. Diminuzione della densità implica che dobbiamo rimuovere quante più molecole possibile nella zona al di sopra della superficie, utilizzando speciali camere in cui all'interno è possibile controllare la densità dei gas e quindi controllarne la pressione.

Per dilatare la scala dei tempi con cui le superfici vengono ricoperte dobbiamo diminuire la pressione di molti ordini di grandezza. È necessario che la pressione diventi paragonabile a quella del vuoto cosmico affinché i tempi di saturazione di una superficie diventino di qualche centinaio o perfino qualche migliaio di secondi.

In questo modo riusciamo ad avere a disposizione il tempo necessario per costruire il sistema che abbiamo progettato. Inoltre la bassa densità di molecole di aria ottenuta nella camera significa che le molecole, nello spazio di un secondo, possono percorrere in media fino ad alcuni metri prima di urtare una parete. Queste due condizioni permettono ad esempio di depositare in modo controllato sulla superficie uno strato di silicio, di ossido di titanio, di oro o di argento, o di altri materiali ancora, con spessore di qualche nanometro, per realizzare un sistema più complesso di strati che alla fine dà luogo ad un componente elettronico miniaturizzato.

Il tempo gioca un ruolo fondamentale anche nella formazione di questi sottili strati. Infatti un atomo che dalla fase di vapore atterra sulla superficie si trova in una situazione complessa definita dalla struttura e dall'ordine degli atomi della superficie stessa. Per capire cosa succede dobbiamo considerare che il panorama strutturale percepito da un atomo è costituito da un insieme di atomi della superficie che possono essere organizzati in maniera ordinata. Questo reticolo di atomi, dal punto di vista della stabilità complessiva del sistema, si comporta come una serie di valli separate da colline, dove la valle corrisponde per esempio alla zona tra un atomo e l'altro, mentre la collina corrisponde alla posizione degli atomi del reticolo. L'atomo che proviene dalla fase gassosa può atterrare su una collina o su una valle, o anche in una zona intermedia. Poiché le valli rappresentano le situazioni in cui l'atomo riduce la sua energia complessiva, sono quelle in cui sarà più probabile ritrovarlo.

Una volta atterrato, si prospettano una serie di possibilità, legate all'energia termica che l'atomo possiede.

Mediamente a temperatura ambiente l'energia termica di agitazione genera un moto vibrazionale di un atomo attorno alla sua posizione che avviene decine di migliaia di miliardi di volte al secondo. In altre parole, un atomo che si trova su una superficie può agitarsi attorno alla sua posizione decine di migliaia di volte in un miliardesimo di secondo. Questo comportamento ha come conseguenza la possibilità che l'atomo riesca a scavalcare una collina che si trova di fronte a lui e passare in quella successiva, cioè l'atomo può muoversi da una valle all'altra attraverso questi balzi.

Possiamo dunque immaginare che gli atomi che atterrano inizino a muoversi, o diffondere sulla superficie e, durante il loro moto possano incontrare un altro atomo atterrato a sua volta. Questi eventi permettono agli atomi di aggregarsi prima in piccoli gruppi e poi in isole sempre più estese, fino a ricoprire tutta la superficie. Controllando quanti atomi possono atterrare attraverso la densità degli atomi nella fase di vapore, e controllando la durata dell'esposizione al vapore del materiale che abbiamo scelto, cioè controllando il tempo della deposizione, possiamo realizzare sistemi complessi a scala nanometrica. Questo ha permesso di sviluppare la moderna tecnologia al silicio.

Su scale molto maggiori, le stesse considerazioni statistiche riguardanti la irreversibilità e la dinamica valgono per i processi atmosferici.

Il secondo giorno Dio fece il firmamento e separò le acque, che sono sotto il firmamento, dalle acque che sono sopra. Dio chiamò il firmamento cielo (Gen *1,6-8)*

Il nostro pianeta si è formato circa 4.6 miliardi di anni fa dall'aggregazione di pulviscolo, ghiacci e gas interstellari che hanno iniziato a contrarsi in seguito all'esplosione di una vicina supernova. Il campo gravitazionale, che si andava rafforzando con l'accrescimento del protopianeta, contribuiva a trattenere sempre più idrogeno ed elio gassosi, i costituenti delle stelle. Si trattava della prima atmosfera della Terra, un'atmosfera simile a quella che osserviamo oggi su Giove, Saturno, Urano e Nettuno. Durò solo 100 milioni di anni, il tempo di un soffio. L'improvvisa accensione delle reazioni termonucleari nel sole, avvenuta 4.5 miliardi di anni fa, generò un'onda d'urto tale da spazzarla via in un istante, l'istante noto come T-tauri. Così non fu per i giganti del nostro sistema solare, più lontani e massicci. Ma tant'è.

Si ricominciò dunque daccapo. Tra i 4 e i 3.8 miliardi di anni fa il nostro pianeta fu oggetto di un intenso bombardamento da parte di meteoriti, frammenti planetari e comete, come tutto il sistema solare. L'energia delle collisioni, unitamente all'energia rilasciata dal decadimento radioattivo di alcuni elementi (il potassio su tutti), cominciò a fondere il pianeta, donandogli una consistenza plastica e mutevole. I gas formatisi dalla degradazione termica dei minerali in quella massa semifluida contribuirono a ricostruire una nuova atmosfera, successivamente alimentata dalle massicce emissioni vulcaniche. Divenne la nostra seconda atmosfera, un'atmosfera *riducente* non troppo dissimile da quella che oggi osserviamo su Venere, ricca di anidride carbonica, vapore acqueo e azoto.

Al termine della fase di bombardamento, circa 3.8 miliardi di anni fa, il pianeta iniziò a raffreddarsi ed il vapore acqueo condensò formando gli oceani. Tutto ciò attivò il ciclo idrologico e con esso l'erosione delle terre emerse. Grandi quantità di calcio vennero riversate negli oceani e questo contribuì, nei successivi 3 miliardi d'anni, a rimuovere l'enorme quantità di anidride carbonica presente nell'atmosfera sequestrandola nei sedimenti oceanici di carbonato.

All'alba di 3.5 miliardi d'anni fa, un evento cruciale si affacciò sul nostro pianeta: nella vastità degli oceani alcuni batteri svilupparono la capacità di utilizzare l'energia luminosa per produrre molecole organiche, affrancandosi dalla lotta (con gli altri batteri) per accaparrarsi la poca sostanza organica allora presente. Nacque la fotosintesi e con essa iniziò a formarsi l'ossigeno, vero e proprio gas di 'scarto' della fotosintesi.

Per circa un miliardo d'anni l'ossigeno liberato rimase negli oceani, intrappolato nei minerali di ferro dei sedimenti (gli orizzonti ferriferi a bande dell'archeano). Solo a partire da 2.4 miliardi d'anni fa l'ossigeno iniziò ad accumularsi nella nostra atmosfera. Ci vollero ancora 2 miliardi di anni perché, nel *Siluriano*, raggiungesse la concentrazione atmosferica attuale (21%). Nel frattempo, alle altezze più elevate, l'ossigeno colpito dai raggi UV iniziò a trasformarsi in ozono e, attorno a 600 milioni di anni fa, la fascia di ozono stratosferico che avvolge la Terra fu completata.

Questo fatto ebbe un'enorme conseguenza evolutiva. La vita, che fino ad allora si era sviluppata solo negli oceani, protetta nell'acqua dai distruttivi raggi UV, poté iniziare a conquistare le terre emerse. Fu l'esplosione *cambriana*, avvenuta 570 milioni di anni fa, che coincise con la comparsa degli organismi pluricellulari e l'avvio di una grande diversificazione in specie della vita.

Nel *Siluriano*, 400 milioni di anni fa, la lenta trasformazione da una atmosfera *riducente* ad una *ossidante* fu completata: si era così formata la terza e nostra attuale atmosfera.

I milioni d'anni seguenti videro il rallentamento dell'attività vulcanica e il procedere della rimozione della CO_2 atmosferica ad opera della geodinamica a cui contribuì la forte attività fotosintetica sulle terre emerse. Da quel momento in poi le uniche variazioni rilevanti sono state le oscillazioni dei livelli di CO_2, con alte concentrazioni che hanno coinciso con periodi caldi e basse concentrazioni con periodi freddi.

L'era geologica attuale, il *Quaternario*, si è aperta 2.6 milioni di anni fa con un periodo di estrema variabilità climatica, marcato da numerose glaciazioni, l'ultima delle quali conclusasi circa 10'000 anni fa. I primi ominidi erano appena comparsi sulla Terra e già si sono trovati ad affrontare una serie di crisi climatiche. Le glaciazioni e le deglaciazioni, innescate da variazioni orbitali come indicato da Milanković, sono state possibili solo per il ruolo di rinforzo 'esplosivo' (*feedback positivo*) giocato dalla CO_2 atmosferica, un gas in grado di alterare il bilancio radiativo del pianeta e generare riscaldamento globale, secondo quel meccanismo oggi noto come effetto serra.

Nell'ultimo milione di anni la concentrazione di CO_2 si è sempre mantenuta tra i 175 e i 300 ppm. Tuttavia negli ultimi due secoli, complice l'avvento dell'industrializzazione, la sua concentrazione ha iniziato ad aumentare, con un'accelerazione vistosa negli ultimi 50 anni che l'ha portata a toccare i 418 ppm nel 2020. Tale aumento, come è noto, desta preoccupazione per la sopravvivenza degli ecosistemi e per il futuro della nostra specie. L'alterazione così rapida della composizione atmosferica ad opera della nostra specie ha fatto dire a Paul Crutzen – premio Nobel per la chimica recentemente scomparso – che siamo entrati in una nuova era geologica determinata dall'uomo: l'*Antropocene*.

L'atmosfera attuale, dunque, è il regalo di 3 miliardi e mezzo di anni di fotosintesi e di una serie di eventi geologici ed astronomici irripetibili. Questo dono è ora nelle nostre mani. A noi il compito di custodirlo.

Il Signore Dio prese l'uomo e lo pose nel giardino di Eden, perché lo coltivasse e lo custodisse (Gen *2, 15)*

Abbiamo visto che la fisica classica permette di indagare il mondo a diverse scale di grandezza, da quella microscopica a quella astronomica, con successo. Ma se consideriamo scale atomiche e subatomiche, occorre la meccanica quantistica per indagare la relazione tra dinamica e tempo, principalmente osservando i fenomeni periodici negli atomici. La nostra esperienza del tempo oscilla tra quella di un tempo che procede ineluttabile in una direzione (in termodinamica diremmo verso stati di maggiore entropia), e di un tempo ciclico, caratteristico di fenomeni o avvenimenti che si ripetono. Questo tema, che investe profondamente la cultura occidentale (Quinzio), ha una controparte nel modo in cui misuriamo il tempo, anch'esso influenzato da questi due aspetti.

Il tempo è generalmente visto come una successione di istanti che si accumulano dandoci una misura di quanto tempo sia trascorso. Perché il trascorrere del tempo sia condiviso da tutti, questi istanti di tempo hanno convenzionalmente una durata precisa, il secondo, che viene oggi costantemente calibrata in diversi laboratori metrologici nel mondo. Il tempo viene dunque misurato con gli orologi, strumenti che si servono di fenomeni periodici, cioè di quei fenomeni che si ripetono con regolarità e che sono uguali a sé stessi dopo un determinato intervallo di tempo chiamato periodo. La successione e l'accumulo di questi periodi di riferimento permette di misurare il tempo.

I primi fenomeni periodici osservati dall'uomo e utilizzati per stabilire calendari e per misurare il tempo sono stati i fenomeni astronomici, come la rotazione della terra attorno al proprio asse o la rivoluzione della terra attorno al sole. Da questi fenomeni, studiati sin dall'antichità, deriva l'unità di misura del tempo che oggi adottiamo, il secondo, definito suddividendo il giorno solare medio in 86400 parti.

Qualche decennio fa, usando orologi estremamente accurati, si è però trovato che i fenomeni astronomici presentano piccole irregolarità che accumulandosi nel tempo rendono necessarie correzioni al calendario. Oggi si preferisce quindi utilizzare una diversa e più affidabile definizione di secondo, ottenuta grazie alla periodicità dei fenomeni che si verificano a livello atomico. Sono stati infatti realizzati orologi assai più accurati, ma che richiedono apparati di una notevole complessità tecnica. Fra essi il dispositivo di maggior precisione è l'orologio atomico al cesio (^{133}Cs), che ci permette di ottenere un errore di frazioni di miliardesimo di secondo al giorno sfruttando il periodo della radiazione emessa dall'elettrone che compie una transizione tra due livelli iperfini dello stato fondamentale dell'atomo. Questo fenomeno è utilizzato oggi per realizzare il campione di tempo ufficiale e pertanto il secondo è definito come la durata di tempo pari a 9.192.631.770 periodi della radiazione emessa in seguito a tale transizione.

I livelli energetici iperfini sono stati oggetto di studio della fisica atomica nei primi anni del Novecento, nei quali la fisica, e la nostra comprensione del mondo a livello sub-microscopico, è stata investita dalla rivoluzione quantistica. I livelli sono determinati dalla interazione tra il momento angolare dell'elettrone sull'orbita elettronica dello stato fondamentale e lo spin nucleare. Le transizioni tra livelli iperfini sono scelte, da una parte, per la loro stabilità e, dall'altra, per la nostra capacità di realizzare sistemi nei quali esse si manifestano minimizzando tutte le possibili perturbazioni esterne che potrebbero introdurre variazioni nel periodo della radiazione.

La misura del trascorrere del tempo si basa sulla accumulazione di istanti di tempo di riferimento che devono essere il più possibile identici tra loro. Questa è dunque la sfida della metrologia moderna: utilizzare le tecnologie quantistiche, cioè la nostra capacità di misurare e manipolare i sistemi su scala atomica, per ‘proteggere’ gli eventi elementari di riferimento, come le transizioni iperfini, sui quali basare poi tutte le applicazioni che richiedono estrema precisione nella sincronizzazione degli orologi.

Se pensiamo ad un riferimento su scala planetaria, gli orologi al cesio e tutti quelli da essi derivati costituiscono il miglior riferimento possibile. Può essere suggestivo ricordare che le transizioni iperfini, così come le transizioni di struttura fine, si basano su una costante di accoppiamento nota come costante di struttura fine, α, che è espressa in termini di alcune costanti fondamentali della natura: la carica dell’elettrone, la costante dielettrica del vuoto, la velocità della luce e la costante di Planck. Una stima di questa costante venne fornita da Sommerfeld quando si pose il problema di capire se gli elettroni del modello atomico di Bohr avessero o meno un carattere relativistico, misurando il rapporto tra la velocità degli elettroni sulla prima orbita dell’atomo di Bohr e la velocità di propagazione della luce nel vuoto.

Questa costante ha un ruolo di primo piano nella fisica, come ricorda Richard Feynmann: «It has been a mystery ever since it was discovered more than fifty years ago, and all good theoretical physicists put this number up on their wall and worry about it». Il suo valore è stato anche messo in relazione con il principio antropico: se fosse diverso anche di poco dal valore misurato nei nostri laboratori, l’universo sarebbe diverso da come lo osserviamo e le leggi della fisica non sarebbero come le conosciamo. Ad esempio, i rapporti tra le forze repulsive e attrattive tra le particelle elementari sarebbero diversi, con conseguenze sulla costituzione della materia e sull'attività delle stelle. In un universo con un diverso valore di α noi stessi non potremmo esistere.

Quindi la misura del tempo più attendibile di cui possiamo oggi disporre coinvolge una costante che potrebbe non essere stata tale, come discute J.D. Barrow in un suo libro pubblicato in Italia nel 2003, tema questo ancora aperto e oggetto di studi nell'ambito dell'astrofisica e della fisica teorica (Wilczy).

Rimane comunque vero che per misurare ciò che cambia abbiamo bisogno di costanti, che siano tali almeno rispetto ai tempi geologici, anche se miliardi di anni fa gli orologi potrebbero essere stati differenti.

La meccanica quantistica ed i fenomeni atomici appena descritti ci offrono una visione del mondo poco intuitiva e lontana da quella della fisica classica, ancorché più fondamentale. Come riconciliare le due visioni? Lo studio del *tempo di coerenza* risponde alla domanda fondamentale: perché il mondo macroscopico è così ben descrivibile dalla fisica classica?

Al livello più fondamentale, l'evoluzione temporale di qualsiasi sistema è determinata dalle leggi della meccanica quantistica. Le particelle quantistiche possono essere descritte attraverso vere e proprie onde, le funzioni d'onda, la cui dinamica è descritta dalla celeberrima equazione di Schrödinger. Immaginiamoci delle onde in mare aperto le cui creste si ripetono all'infinito sia nello spazio (il mare sarà ricoperto di creste e valli delle onde a perdita d'occhio) che nel tempo (se siamo su una barca oscilleremo in alto e in basso in maniera continuamente ripetuta). L'equazione di Schrödinger descrive la lunghezza d'onda e la frequenza di queste onde ma, intrinsecamente, restituisce una dinamica oscillatoria che si ripete all'infinito, proprio come le onde nel mare. In meccanica quantistica non esiste quindi una freccia del tempo irreversibile, come siamo abituati a pensare.

Un paradosso molto interessante riguarda, per esempio, il caso molto semplice di elettroni all'interno di un metallo. La meccanica quantistica prevede che, se colleghiamo una batteria a un filo metallico in modo da ottenere un campo elettrico costante, gli elettroni inizieranno ad oscillare intorno alla loro posizione di equilibrio. Queste oscillazioni, dette oscillazione di Bloch, impediscono che possa scorrere una corrente elettrica, che implica un passaggio di cariche (gli elettroni) da una parte all'altra del filo. La meccanica quantistica, che tanto successo ha nel descrivere le particelle e interazioni fondamentali, non riesce a descrivere il semplice scorrere di cariche elettriche da un capo a un altro di un filo!

Questo apparente paradosso è legato al fatto che l'equazione di Schrödinger descrive l'evoluzione di un sistema quantistico *isolato* dal resto del mondo, in cui, quindi, è assente qualsiasi tipo di interazione. Ciò che determina il passaggio dal mondo 'quantistico' a quello 'classico' sono proprio le interazioni che tendono inevitabilmente a modificare le funzioni d'onda e far perdere la natura quantistica di qualsiasi sistema. È come se le onde che si propagano nel mare si infrangessero contro una grande quantità di scogli disposti in maniera casuale. Quello che ne risulterebbe sarebbe un'increspatura disordinata del mare (l'energia delle onde viene conservata!), ma senza che vi possiamo riconoscere la regolarità nel tempo e nello spazio che avevamo prima.

Ma nel mondo reale quanto velocemente avviene il processo di perdita di informazione quantistica, detta fenomeno di decoerenza? Torniamo all'esempio degli elettroni che si muovono nel filo di materiale metallico: nel movimento gli elettroni interagiscono tra di loro e con le vibrazioni del reticolo formato dagli ioni del cristallo, dette fononi nel linguaggio quantistico. Questa interazione è naturalmente tanto più forte quanto è maggiore la temperatura. A temperatura ambiente, i tempi tipici di interazione degli elettroni sono dell'ordine di 1-100 femtosecondi (1 femtosecondo = 0.000000000000001 s) cioè da 1 a 100 milionesimi di miliardesimi di secondo! Questi tempi sono così brevi che, a tutti gli effetti, il trasporto di cariche all'interno di un filo conduttore può essere descritto da equazioni classiche senza che vi sia più alcuna traccia della natura quantistica degli elettroni.

È possibile però aumentare il tempo di decoerenza diminuendo la temperatura del nostro sistema fisico. Il progressivo 'congelamento' delle vibrazioni del reticolo, per esempio, rende molto minore la probabilità di interazione con gli elettroni e facilita la 'conservazione' delle onde quantistiche. A bassa temperatura possono emergere, quindi, molti fenomeni interessanti caratterizzati dal fatto che la materia si comporta non più come un insieme incoerente di particelle, ma come un'unica onda. Tra questi fenomeni ricordiamo la condensazione di Bose Einstein di gas di atomi, la superfluidità dell'elio liquido e, soprattutto, la superconduttività. Nei materiali superconduttori, il tempo di decoerenza diventa così lungo che gli elettroni si possono muovere all'interno del materiale 'protetti' da qualsiasi interazione dando luogo a fenomeni di grande potenziale tecnologico come il trasporto di corrente senza dissipazione di energia.

In generale, utilizzare le informazioni contenute all'interno delle funzioni d'onda quantistiche apre la porta alla cosiddetta 'Computazione Quantistica' che permette di svolgere operazioni e immagazzinare informazioni in maniera molto più efficiente rispetto alla computazione classica, su cui si basano i dispositivi che utilizziamo quotidianamente. La sfida scientifica e tecnologica è, da una parte, prolungare i tempi di decoerenza nella materia e, dall'altra, sviluppare protocolli per effettuare operazioni più velocemente del tempo in cui il sistema perde la sua natura quantistica.

L'era quantistica è alle porte… è solo una questione di tempo!

In tutto ciò che precede, sia riguardo alla fisica classica che a quella quantistica, la concezione del tempo galileiano e newtoniano è sufficiente a descrivere i fenomeni. I problemi riguardo a questa concezione del tempo vengono sollevati quando si indagano le proprietà della luce. Incredibilmente, queste indagini portano ad una nuova concezione del tempo.

Il celeberrimo *Fiat Lux* della Genesi divide un Universo vuoto e nero da uno avvolto nella luce. Sembra quasi che la genesi della luce coincida con la genesi del Tempo. È un'ipotesi suggestiva. È anche sensata rispetto alle conoscenze attuali?

Ciò che accade nell'universo attorno a noi è noto attraverso l'interazione con la luce, che trasporta informazioni. I nostri enunciati sulla realtà, nel dominio della fisica classica, riguardano relazioni tra corpi rigidi, orologi e luce o, più tecnicamente, onde elettromagnetiche.

Il fatto importante è che la velocità di propagazione nel vuoto delle onde elettromagnetiche è una costante indipendente dallo stato di moto dell'emettitore o, equivalentemente, dallo stato di moto dell'osservatore. Questa proprietà, combinata con il principio di relatività, ha conseguenze di enorme rilievo poiché la luce è il messaggero per eccellenza ed ha uno status speciale. Le sue particolari caratteristiche non riguardano soltanto il fenomeno elettromagnetico in sé, *ma la trama stessa dello spazio e del Tempo*. Non abbiamo altro mezzo per definire la simultaneità tra eventi che affidare il messaggio ad un'onda luminosa, che ha velocità *finita*.

Immaginiamo di usare un impulso luminoso sferico per sincronizzare due orologi fermi e posti alla stessa distanza, A alla mia sinistra e B alla mia destra. Un osservatore solidale chiaramente giudicherebbe che gli orologi sono stati avviati *contemporaneamente* dal raggio luminoso. Non sarebbe della stessa idea un osservatore in moto verso A. A causa della costanza della velocità della luce, e poiché dal suo punto di vista A si muove verso il raggio luminoso, vedrebbe *prima* la attivazione dell'orologio A e *dopo* quella dell'orologio B. Se non abbiamo altro metodo operativo per sincronizzare gli orologi, dobbiamo concludere che *il concetto di simultaneità non è assoluto, ma dipende dallo stato di moto dell'osservatore*. Non solo. Il difetto di sincronizzazione degli orologi si trasferisce facilmente al concetto che il Tempo di osservatori in moto relativo tra loro *scorre in modo diverso*. Che significato attribuire a questa affermazione?

Riguardo al singolo osservatore, al suo tempo proprio, non si notano conseguenze: il principio di relatività stabilisce infatti che ogni esperimento fisico debba avere per ciascun osservatore inerziale la stessa forma, dinamica e conclusione. È il raffronto di eventi tra osservatori in stati di moto differenti che pone questioni interessanti.

Il tempo assoluto di Galileo e Newton, che prevede che gli intervalli di tempo siano gli stessi per tutti gli osservatori, indipendentemente dal loro stato di moto, è superato a causa della finitezza della velocità della luce e del suo status di messaggero privilegiato. Il tempo assoluto implica infatti una velocità di trasmissione delle informazioni *infinita*. Ma questo, allo stato attuale delle conoscenze, non è possibile. Il limite di trasmissione di qualsiasi messaggio è dato dalla velocità della luce. Questo fatto è imposto dal *principio di causalità*, che, più tecnicamente, comporta che lo stesso intervallo tra eventi visto da differenti sistemi di riferimento inerziali non possa cambiare di segno.

Cosa accade dal punto di vista dell'onda elettromagnetica? Poiché le informazioni si trasmettono con velocità inferiore alla velocità della luce, per un osservatore che si muove con velocità prossima a quella della luce gli intervalli di tempo proprio sono *enormemente dilatati*.

Ritorniamo ora al nostro suggestivo confronto iniziale. È stupefacente che una definizione operativa, la sincronizzazione di due orologi, porti con sé conseguenze così radicali e poco intuitive rispetta alla natura del Tempo. E che in molte tradizioni l'inizio del tutto venga rappresentato con un lampo iniziale di luce. Ed anche che la luce porti con sé informazioni sul quel primo istante. E che quel primo istante si dilati, dal punto di vista della luce emessa, in un intervallo che includa l'inizio, il presente e (anche se ancora non sappiamo con certezza come andrà a finire) la fine.

Ma le proprietà della luce non bastano a catturare in modo definitivo il concetto di tempo. In modo controintuitivo, scopriamo che il campo gravitazionale pone vincoli sulla nostra concezione del tempo.

Avete presente il quadro di Salvador Dalí, *La persistenza della memoria*? I protagonisti del dipinto sono gli orologi. Ce ne sono tre che si liquefanno, come gigantesche fette di camembert sotto il sole cocente, assumendo la forma dei loro sostegni. C'è un quarto orologio che è rimasto solido, ma che viene invaso dalle formiche. Sullo sfondo risalta la purezza delle forme geometriche di un parallelepipedo. La geometria salverà forse il tempo?

Sembra che Dalì in origine avesse in mente la fluidità del tempo psicologico, ma che in seguito fosse rimasto affascinato dal fatto che la sua immagine ben si prestasse a rappresentare certi aspetti del mondo fisico. Lo ha ribadito l'artista stesso nel suo Manifesto antimaterico: «Oggi, invece, il mondo esteriore e quello della fisica hanno superato quello della psicologia».

Siamo abituati a pensare al tempo fisico come a qualcosa di assoluto, identico per tutti gli osservatori. Questo però non è vero per gli oggetti che si muovono in modo molto veloce: prendiamo due gemelli, Leila e Luke, separati alla nascita. Assumiamo che Luke rimanga sulla terra, mentre Leila parta per un viaggio interstellare con un'astronave capace di viaggiare a velocità prossime a quella della luce. Al ritorno dalla gita galattica, Leila sarà molto più giovane di Luke!

La gemella che si muove a velocità vicine a quella della luce invecchia in maniera più lenta. Infatti, dal punto di vista dell'osservatore che rimane sulla terra, i segnali che vengono scambiati tra le varie parti delle cellule e degli organi di Leila percorrono molta più strada. La velocità di percorrenza di un segnale fisico è limitata dalla velocità della luce; per questo motivo gli scambi chimici tra le cellule di Leila avvengono più lentamente rispetto a quelli nelle cellule di Luke. Questo rallentamento del tempo non riguarda solo gli organismi viventi, ma anche gli oggetti inanimati, come un orologio a pendolo o al quarzo.

Anche i campi gravitazionali influenzano lo scorrere del tempo. In montagna il tempo passa un pochino più veloce che al livello del mare. Si tratta di un effetto molto piccolo, dell'ordine di 10^{-13}, ma è comunque importante per il funzionamento dei moderni GPS: trascurandolo, questi accumulerebbero un errore pari a 8 metri al minuto e dopo poche ore risulterebbero inutilizzabili.

Nel caso dell'intenso campo gravitazionale dei buchi neri (che sono oggetti così densi dai quali neanche la luce può sfuggire), il fenomeno assume una ben più vasta portata. Recentemente è stato popolarizzato dal film *Interstellar*. Dal punto di vista di un osservatore lontano da un buco nero, l'immagine di una sonda che ci cade dentro rimane ferma nell'istante in cui la sonda attraversa l'orizzonte degli eventi, che è definito come il limite invalicabile dal quale niente può scappare, secondo le leggi della fisica classica. Per questo motivo i buchi neri vengono chiamati anche «stelle congelate».

Secondo la fisica moderna, dobbiamo quindi pensare ai nostri orologi come a oggetti fluidi, che misurano un tempo diverso a seconda della loro velocità di movimento e della presenza di un campo gravitazionale. L'immagine del quadro di Dalí risulta quindi molto appropriata. Non bisogna però pensare a questa fluidità come a un crollo delle nostre certezze sul mondo fisico. La relatività si regge sulla solida impalcatura della geometria differenziale. In un certo senso la geometria ha davvero salvato il tempo. Mi piace pensare al parallelepipedo del quadro di Dalì come a un omaggio al ruolo della geometria nel descrivere precisamente le bizzarrie del tempo della fisica relativistica.

Ci sono però situazioni in cui anche la geometria fallisce. Se le prendiamo alla lettera, le equazioni della relatività ci dicono che un osservatore che cade dentro a un buco nero arriva alla fine del tempo. Tutto ciò ci appare assurdo: come può finire il tempo? La fine del tempo avviene in un regime in cui le nostre equazioni diventano inaffidabili, a causa delle grandi curvature spazio-temporali. Dovranno essere modificate in modo ancora a noi ignoto, per tener conto di complicati effetti quantistici. La geometria quindi non riesce sempre a salvare il tempo. Ci riuscirà la meccanica quantistica?

L'aggiunta della meccanica quantistica, insieme alle proprietà della luce e del campo gravitazionale, modifica e discretizza il tempo, in un quadro non ancora concluso.

Le unità di misura in fisica nacquero su base antropometrica (pollice, piede, cubito ecc.). Successivamente, per stabilire standard più precisi e riproducibili, le unità di misura vennero associate a specifici esperimenti fisici. Comunque la si veda, sempre di 'materia' si tratta, sia che si parli della lunghezza dell'avambraccio di Eracle (il cubito), o della durata di 9.192.631.770 oscillazioni di una data transizione del Cesio 133 (il secondo).

C'è una sola eccezione: esiste un'unità di misura 'speciale', detta di Planck, che intenzionalmente non fa uso alcuno di materia: se mai mi dovesse capitare di parlare di fisica con un extraterrestre, io userei le unità di misura di Planck (e se non vi fosse Cesio nel loro pianeta?).

Tre costanti in fisica sono ritenute universali: la velocità della luce c (dal latino *celeritas*), la costante di Planck $\hbar$, e la costante di gravitazione universale G. Il loro valore, per ora, non ci interessa: nelle unità di Planck, queste costanti sono poste uguali a 1. Per esempio, se si pone $c=1$, vuol dire misurare tutte le velocità in unità di c, ovvero come frazioni di velocità della luce, numeri puri. Ma se la velocità è un numero puro, ne segue che nelle unità di Planck tempo e lunghezza hanno la medesima unità di misura. D'altro canto, tempo e spazio sono inestricabili, non esiste l'uno senza l'altro. Così come lo spazio, il tempo è nato insieme al nostro universo. Spesso si sente domandare: e prima? È un non-sense, perché l'avverbio 'prima' comporta un ordinamento cronologico, che in assenza di tempo perde di significato.

Sant'Agostino lo aveva ben chiaro molto prima di noi: «Non è nel tempo che tu precedi i tempi».

Le condizioni $c=\hbar=G=1$ possono essere usate per definire la lunghezza, il tempo e la massa di Planck, in termini di unità di misura convenzionali. Ne escono dei numeri stupefacenti. Ad esempio, la lunghezza di Planck vale $L_P=\sqrt{(\hbar G/c^3)} = 1.6\ 10^{-35}$ m. Per capire quanto è piccola questa lunghezza, prendiamo un singolo granello di sabbia, e immaginiamo di ingrandirlo a tal punto, da farlo diventare grande come tutto l'universo visibile. E se ora applicassimo il medesimo ingrandimento a una lunghezza di Planck L_P, quanto grande diventerebbe? Più piccola di un granello di sabbia. Il tempo di Planck T_P $=\sqrt{(\hbar G/c^5)} = 5.4\ 10^{-44}$ sec è il tempo impiegato dalla luce a percorrere una distanza pari a L_P. 'Infinitesimo' è un concetto matematico, ma se mai dovessi utilizzare questo sostantivo per una qualche grandezza fisica, senza dubbio lo riserverei alle grandezze di Planck.

Le tre costanti che definiscono le unità di Planck sono specifiche di tre teorie fisiche: relatività (c), meccanica quantistica ($\hbar$) e gravitazione (G). Se in una formula trovate $\hbar$, si tratta certamente di una formula quantistica, garantito. E così analogamente per c e G. Si possono anche combinare a coppie, per cui ad esempio combinando c e G otteniamo la relatività generale, oppure combinando c e $\hbar$ si ottiene una teoria quantistica relativistica. Ma le unità di Planck, le combinano tutte e tre! Quindi, l'ambito naturale delle unità di Planck è quello in cui sono rilevanti simultaneamente relatività, gravitazione e meccanica quantistica. E di quale teoria si tratta? Non lo sappiamo. Tanti la chiamano teoria del tutto, altri gravità quantistica, altri ancora M-theory. Quello che è certo, è che ci si riferisce a condizioni fisiche estreme, non facilmente riproducibili in natura, quali ad esempio l'interno di un buco nero, o la nascita del nostro stesso universo.

Ci manca ancora un ingrediente: la struttura granulare del tempo. La meccanica quantistica ci ha abituato all'idea che molte grandezze fisiche, ritenute per secoli continue, siano in realtà discrete, 'quantizzate'. Così è anche per il tempo. Non possiamo individuare intervalli temporali arbitrariamente piccoli. A causa del principio di indeterminazione tempo-energia, la localizzazione temporale di un evento con precisione infinita costerebbe un'energia infinita e, di conseguenza, il tempo ha una struttura granulare.

E che cos'è il tempo di Planck? Ci piace pensare che sia quel primo granello di tempo che è scaturito dal Big Bang alla nascita del nostro universo.

Bibliografia

J.D. Barrow, *I numeri dell'universo: le costanti di natura e la Teoria del tutto*, Mondadori, Milano 2003.

R. Feynman, *QED: The strange theory of light and matter*, Princeton University Press, Princeton 1985.

G. Galilei, *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo* (1632).

C. Huygens, *Horologium oscillatorium: sive de motu pendulorum ad horologia aptato dimostrationes geometricae* (1673).

E. Mach, *La meccanica nel suo sviluppo storico critico* (1912).

Newton, *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (1687).

S. Quinzio, *Radici ebraiche del Moderno*, Adelphi, Milano 1990.

M.R. Wilczynska - J.K. Webb - M. Bainbridge, *Four direct measurements of the fine-structure constant 13 billion years ago*, in «Science Advances», 6, 2020.

Intelligenza

Introduzione

È tutt'altro che semplice definire la parola intelligenza. Ciascuno di noi ne dà una definizione soggettiva e pertanto particolare, rendendo di fatto la generalizzazione del termine assai ardua. Pur ammettendo una definizione univoca, è inevitabile sollevare quesiti di natura più profonda: oltre a quella umana, in quali termini si può definire l'intelligenza animale? E, per citare un problema molto attuale, che senso ha attribuire la proprietà dell'intelligenza a una macchina?

Intelligenza biologica

«Domattina alle 6 sarò giustiziato per un crimine che non ho commesso. Dovevano giustiziarmi alle 5, ma ho un avvocato in gamba!»: così nel 1975 Woody Allen rifletteva sul significato della vita e della morte nel film *Amore e Guerra* suscitando una risata nella maggior parte delle persone. Non in tutte: qualcuno non ride, perché non riesce a capire che cosa ci sia di buffo nella frase. C'è chi prende molto seriamente l'umorismo, al punto di studiarlo scientificamente nell'ambito di una disciplina che prende il nome di *umorismo computazionale*. Non si tratta, beninteso, di una ricerca oziosa e fine a sé stessa: al contrario, gli scienziati sospettano che l'umorismo abbia a che fare (e molto) con l'intelligenza umana. L'atto del ridere, in definitiva, riflette un processo cognitivo molto complesso e che potrebbe basarsi sulla contraddizione di alcune basi razionali. Una scena comica è divertente perché viola le regole del cosiddetto *senso comune*, come accade nella classica proposizione della coppia Stanlio e Ollio alle prese con una casa da ristrutturare (*Big business*, 1929): invece di lavorare come muratori esperti, i due distruggono l'abitazione in una serie crescente di gag, tirandosi un martello sul pollice della mano oppure facendo cadere un secchio di vernice sulla testa dell'altro. Sembra che il nostro cervello trovi molto divertente la violazione di una implicazione logica (se due muratori ristrutturano una casa è perché sono esperti nel loro mestiere e non degli incompetenti), sia verbale che fisica. Il motivo per cui una persona che ruzzola goffamente per terra scateni l'ilarità di qualcuno non è ancora completamente compreso dagli psicologi, ma di nuovo è probabile che, quando il cervello umano si trova di fronte a una situazione inaspettata, reagisca in un modo del tutto particolare. Tuttavia, se in quest'ultimo esempio la risata sembra essere un meccanismo automatico, le cose diventano più complesse nel caso di una storia caratterizzata da toni umoristici (si pensi al romanzo dello scrittore inglese Jerome K. Jerome *Tre uomini in barca (per tacere del cane*), che per essere compreso richiede, oltre a un processo di analisi semantica e semiotica, anche una conoscenza del contesto culturale.

Se l'interpretazione dell'umorismo richiede la considerazione di altri aspetti, oltre a quello dell'intelligenza, soffermiamoci per qualche istante su un altro processo cognitivo: la bugia. Ciascuno di noi, in una certa misura, è stato oppure è un bugiardo: arriviamo tardi in un ufficio dando la colpa al solito treno (in realtà, non abbiamo sentito la sveglia), biasimiamo gli altri quando prendiamo decisioni sbagliate (mentre invece la responsabilità è nostra e di nessun altro) fino ad arrivare a elaborare bugie molto complesse, come accade frequentemente nelle teorie complottiste. Ma che cos'è, in definitiva, una bugia? In primo luogo, è una distorsione dei fatti, caratterizzata dal fatto di voler essere razionale (perché tenta di produrre una spiegazione causale diversa da quella reale) e dall'essere composta da altre bugie, tenute insieme in modo più o meno maldestro. Eppure, anche se una bugia suona incredibile alle orecchie di chi ascolta, essa viene talvolta creduta. In altre parole, chi sta di fronte a un interlocutore può essere portato a credere a tutto quello che sente fino a quando permane un'empatia (un sentimento molto più intenso della *simpatia*) tra le due parti. La tecnica del venditore, che mira a convincere un possibile acquirente, consiste nell'entrare in sintonia con quest'ultimo, adottandone lo stile, il modo di parlare e persino il modo di vestire. Dunque, il bugiardo fa qualcosa di più che proporre una costruzione semantica opposta a quella fattuale: persuade l'ascoltatore a sospendere qualsiasi pensiero critico (che dovrebbe intervenire immediatamente e rivelare la bugia per quello che è: un costrutto fantasioso pieno di contraddizioni e, per questo, improbabile).

È così facile ingannare il cervello? Di solito, si pensa che una persona intelligente non sia portata a credere alle bugie, tuttavia è sufficiente pensare a qualche semplice esempio per vedere quanto questa credenza sia illusoria. Immaginate di essere tra gli invitati di una festa: non conoscete nessuno e vi aggirate, un po' smarriti, con il classico bicchiere semipieno in mano. Finalmente, qualcuno vi rivolge la parola: è una persona divertente ed estroversa, perfetta per rompere il ghiaccio. Ad un certo punto, vi viene chiesto di scommettere cinquanta euro sul fatto che tra gli invitati ci siano *almeno* due persone nate lo stesso giorno. Scettici, vi rifiutate di perdere così facilmente il vostro denaro e vi allontanate con la scusa di voler riempire il vostro bicchiere. Dopotutto, vi siete detti, la probabilità che a una festa ci siano due persone che festeggiano lo stesso compleanno vi sembra assurda. Applicando un ragionamento ben preciso[1], si vede che già con 23 invitati, la probabilità che almeno due siano nate lo stesso giorno è intorno al 50%. In breve: il nostro cervello ci ha ingannato, avremmo dovuto scommette-

[1] Se avete ragionato in questo modo, vi siete sbagliati. L'errore nasce dal fatto che la soluzione del problema, peraltro controintuitiva, consiste nel considerare che non ci si riferiva al giorno della festa in questione, ma che non è noto il giorno nel quale i due festeggiano il compleanno assieme. Infatti, la probabilità che due persone non siano nate lo stesso giorno è di 365365 x 364365 vale a dire circa il 99,73%; di conseguenza, la probabilità che due persone siano nate lo stesso giorno sarà lo 0.27%. Se invece le persone sono tre, allora la probabilità che non siano nate lo stesso giorno diventa pari a 365365 x 364365 x 363365 = 99.18%, ma che lo siano è di 0.82% e così via.

re. Cosa sappiamo dell'intelligenza? Pregiudizi (di ogni tipo) ci hanno portato a esprimere considerazioni molto restrittive su di essa: che serva solo a fare di conto, che sia appannaggio di pochi, che non riguardi le specie animali e che, in caso di bisogno, sia meglio utilizzare altre doti, come l'intuito o il sentimento (quest'ultima è una conclusione ingannevole: come dire che è meglio far decidere *la pancia* invece *della testa*).

Cominciamo a sfatare il primo luogo comune, cioè che chi ha dimestichezza con la matematica sia necessariamente intelligente[2]. Se ciò fosse vero, saremmo autorizzati a pensare che il nostro personal computer abbia già superato le capacità intellettuali del nostro cervello da parecchio! In realtà, le cose sono un po' diverse e per capire perché, è utile considerare il lavoro degli psicologi, probabilmente i primi ad essersi occupati del problema inerente alla misurazione dell'intelligenza dell'individuo, classificandola in *analitica*, *creativa* e *pratica*. Difficilmente queste tre definizioni si ritrovano nella stessa misura in una persona che definiremmo intelligente, tuttavia è innegabile che un matematico deve essere fantasioso nel trovare la dimostrazione di un teorema; che un pittore deve essere capace di elaborare i pensieri astratti e che il tassista deve elaborare una rete di informazioni molto complessa per portare il passeggero a destinazione.

[2] Alcuni scienziati cognitivi sostengono che ci sia una forte evidenza che l'abilità di fare i conti sia innata. Detto in altre parole: siamo bravini a fare i conti dalla nascita così come, secondo il linguista americano Chomsky, abbiamo una predisposizione all'apprendimento del linguaggio.

Alcune persone, nel lavorare a un problema, esercitano l'intelletto fino a quando trovano, se esiste, un'unica soluzione. Utilizzano, in altre parole, quello che si chiama *pensiero convergente*, diversamente da coloro che riflettono sulle diverse strade per arrivare alla soluzione, seguendo cioè un pensiero divergente.

Se la chiave dell'intelligenza risiede nella creatività, allora notiamo subito che quest'ultima, a sua volta, ruota intorno a cinque concetti chiave: l'*esperienza*, l'abilità di *visualizzare* i concetti, la capacità di scegliere e dunque, di assumere dei *rischi*, senza dimenticare il *divertimento* dell'esperienza in sé e l'*ambiente* che ci circonda. Le cose si complicano se vogliamo considerare anche la *linguistica* intesa, in questo contesto, come l'abilità di saper parlare e scrivere bene; l'abilità *logica-matematica*, necessaria per risolvere alcuni tipi di problema; la capacità di ragionare in modo *spaziale*; il fatto di poter seguire ed apprezzare la *musica*; il senso del *ritmo* e del *coordinamento*, essenziali quando si pratica uno sport; l'*interazione* con gli altri, finalizzata alla comprensione di ciò che ci viene detto; la facilità con cui vediamo noi stessi, in altre parole, il modo in cui *interiorizziamo* il nostro essere e, infine, la comprensione del rapporto che ci lega con la *natura*.

C'è un altro fattore da considerare, l'età. Rimanendo in campo matematico, citiamo un aneddoto ben noto agli esperti del settore ovvero che la creatività matematica tende a ridursi fino a scomparire entro i quarant'anni. Qualcuno ha preso molto sul serio questo (forse discutibile) punto di vista: la medaglia *Fields* – l'equivalente del premio Nobel per i matematici – viene assegnata ogni quattro anni a coloro che non abbiano superato il quarantesimo anno di età. Sono stati premiati nomi eccellenti, a cominciare da Paul Cohen su alcuni studi di logica matematica fino a Edward Witten, su temi di ricerca inerenti alla relatività generale, senza dimenticare gli italiani Enrico Bombieri ed Alessio Figalli, medaglie Fields rispettivamente per lavori sulla teoria dei numeri e il trasporto ottimo. Ci sono dei grandi esclusi? Certamente, a cominciare dal britannico Andrew Wiles e il problema su cui ha speso buona parte della vita: se è vero che la somma dei quadrati di due numeri può essere a sua volta il quadrato di un numero (per esempio: il quadrato di tre, sommato al quadrato di quattro, dà come risultato il quadrato di cinque), nessun cubo può essere il risultato della somma di due cubi e così via per esponenti superiori. Si tratta di un problema posto per la prima volta da Pierre de Fermat nel 1637, un avvocato che amava cimentarsi in problemi matematici per diletto. Sempre per diletto, dimostrò il teorema quando l'esponente è uguale a quattro. La dimostrazione si poteva generalizzare per un qualsiasi esponente superiore? Fermat pensava di sì, ma lasciò i posteri di stucco scrivendo una noticina su un libro che stava leggendo (un lavoro di Diofanto di Alessandria, l'*Arithmetica*): «Ho una meravigliosa dimostrazione di questo teorema, che non entra nel margine stretto della pagina».

Solo nel 1995, Andrew Wiles dimostrò finalmente il teorema di Fermat (non senza aver commesso un errore, che venne comunque risolto). Tuttavia, rimase a bocca asciutta: non gli venne conferita nessuna medaglia Fields a causa dell'età (non indignatevi: Wiles ebbe il premio Wolf e il premio Abel nel 2016).

Buona parte di quanto detto demolisce un'altra falsa credenza, cioè che l'intelligenza si trovi solo in un gruppo di persone. Il fisico americano William B. Shockley fu insignito, nel 1956, del premio Nobel per la fisica per la scoperta del transistor che rivoluzionò l'elettronica, oltre a porre nuove basi per la costruzione dei calcolatori elettronici. Purtroppo, Shockley ha fatto un pessimo uso della sua intelligenza, trascorrendo buona parte della sua vita nel tentativo di dimostrare la superiorità razziale dell'uomo bianco, il che dimostra che se da una parte persone molto intelligenti possono arrivare a scoperte scientifiche strabilianti, dall'altra le stesse incappano in pregiudizi razziali, privi di qualsiasi fondamento. Eppure la questione se l'intelligenza sia equamente distribuita nei gruppi etnici ha radici lontane, in una disciplina chiamata *eugenetica*, di cui si sono appropriate ideologie politiche tristemente famose cercando di definire il concetto di razza partendo da una base biologica (invece che da un fenomeno socio-politico, come proposto da numerosi antropologi). Di conseguenze, quando le statistiche ci ricordano che gli studenti più bravi del mondo nelle discipline scientifiche provengono da Singapore, Hong Kong, Corea, Cina e Giappone (noi Italiani siamo messi maluccio), occorre capire prima il contesto scolastico, nonché familiare e sociale, in cui certi risultati si sviluppano più facilmente.

Se è vero che l'intelligenza è parte di noi (dunque è un attributo biologico), a cosa serve? E come si è sviluppata? Un celebre film di fantascienza si apre in modo alquanto insolito: un gruppo di esseri scimmieschi (i primi *homo sapiens*?) lottano quotidianamente con un'altra tribù per il possesso dell'acqua, oltre ad essere assaliti da belve feroci, fino a quando un misterioso monolite (le cui dimensioni sono *1 x 4 x 9*, i quadrati dei primi tre numeri naturali) appare di fronte a loro. Il più coraggioso di tutti, lo tocca… Con conseguenze inimmaginabili. Avrete riconosciuto la trama del film di Stanley Kubrick *2001: Odissea nello spazio*, che descrive in modo visuale (ed ineccepibile) sia la scintilla dell'intelligenza (il nostro bipede, giocando con delle ossa, scopre di poterle usare sia come arma di difesa che di offesa, proteggendosi dagli animali e arrivando a sconfiggere la tribù avversaria nella lotta per l'accesso a una sorgente), che il percorso dell'uomo in migliaia di anni (dopo uno scontro sanguinoso, il protagonista lancia in aria l'osso usato come arma che, ricadendo, si dissolve in una specie di *space shuttle* che si dirige verso una base lunare). In prima battuta, possiamo dire che l'intelligenza serva a sopravvivere. La scoperta del fuoco ha permesso sia di riscaldarsi che di cucinare delle pietanze, ma allo stesso tempo ha consentito di forgiare nuovi metalli. La coltivazione ha fatto sì che non si morisse di fame, mentre l'utilizzo di animali come il cavallo ha permesso a gruppi nomadi di spostarsi in territori meno ostili ed effettuare i primi commerci. La costruzione di case ha fatto sì che piccole comunità potessero aggregarsi e diventare società, che a loro volta hanno fondato culti e religioni. La qualità e la durata della vita è andata via via migliorando: se nell'età del Bronzo l'aspettativa di vita media era di 26 anni, nella Roma classica era di 30 (avrebbe potuto essere maggiore senza le guerre e la peste?), 40 nell'Inghilterra all'inizio del XIX secolo, per arrivare a 72 anni circa nel 2017, nel mondo. Non solo: l'intelligenza serve a comprendere un mondo che diventa, ad ogni generazione, sempre più complesso. Le innovazioni scientifiche e tecnologiche impongono continuamente cambi sia di prospettiva che di paradigma: non solo l'uso e la comprensione del calcolatore sono essenziali per muoversi nel mondo di oggi, ma addirittura parole esoteriche come *algoritmo* e *scienza dei dati* acquisiscono un ruolo sempre più importante nelle nostre vite.

Il che porta a discutere un quesito interessante: le scoperte (non solo scientifiche) ci rendono più intelligenti? Per rispondere a questa domanda, è opportuno soffermarsi su alcuni momenti storici: la scoperta della stampa e Internet. Cominciamo dal lavoro di Johannes Gutenberg: nel 1455, egli introdusse una nuova tecnica di stampa (in realtà è più corretto dire che la riscoprì, visto che era già usata dai cinesi) a caratteri mobili, che in soli 50 anni consentì di far circolare in tutta Europa trentamila titoli con una tiratura di circa dodici milioni di copie. La gente cominciò a leggere: non solo i dotti e gli aristocratici, ma anche le persone comuni iniziarono a leggere la Bibbia, una rivoluzione comparabile a quella avvenuta nella Grecia di Socrate e Platone, dove il testo scritto sostituì gradualmente la tradizione orale. Per molti aspetti, Internet ripercorre i passi di Gutenberg: nel 1989 un ricercatore britannico, Tim Berners-Lee, ideò il concetto di ipertesto, che è alla base delle pagine di internet. Per come è strutturata, la rete permette di accedere istantaneamente a una vasta rete di conoscenza: secondo alcuni, Internet ci rende (o ci renderà) più intelligenti. Per quale motivo? Per cominciare, la rete ospita libri (non solo testi liberi dal diritto d'autore, come nei 60.000 testi circa che si possono trovare sulla pagina del progetto Gutenberg, https://www.gutenberg.org/, ma anche Google books https://books.google.com/, che mette a disposizione versioni parziali di libri tuttora in commercio), film (alcuni a titolo gratuito, altri a noleggio), documenti storici, musei virtuali, corsi di formazione, concerti per i gusti di tutti, corsi universitari e così via. Oggi è più facile istruirsi, comprendere, confrontarsi: in una parola, sapere. La conoscenza non è più elitaria, ma si rivolge a tutti, qualunque siano la lingua parlata, il livello culturale o economico.

Il volume di informazioni disponibile su Internet cresce a ritmi vertiginosi, richiedendo alla scienza e alla tecnologia nuove soluzioni e architetture che consentano ai motori di ricerca che usiamo quotidianamente di fornire risposte che siano veloci e mirate. Non solo: il web è partecipazione attiva e non passiva. È l'utente stesso a creare nuove forme del sapere: si pensi, ad esempio, al progetto Wikipedia, amministrato da utenti della rete che ogni giorno aggiornano una fonte di conoscenza che ha reso del tutto obsoleta la vecchia enciclopedia acquistata a fascicoli tanto tempo fa. Resta inteso che Wikipedia contiene inevitabilmente degli errori o delle lacune, ma come sosteneva lo storico americano Roy Rosentzweig, essa ha un'arma potentissima, la capacità di *self-healing* ovvero l'abilità di auto-correggersi. Ogni volta che un utente Wikipedia scova un'imprecisione in una pagina, può correggere l'errore (dopo uno scambio di opinioni con la comunità di utenti) o decidere di rendere più chiaro il contenuto. Quali sorprese ci riserva il web? Innanzitutto, esso si evolverà dalla forma rozza con cui lo conosciamo – cioè passerà dall'essere puramente *sintattico* (i motori di ricerca si limitano a individuare tutte le pagine web che contengono le parole chiave da noi utilizzate, per poi riordinarle secondo un criterio di popolarità, a volte proponendo cose che non c'entrano nulla con la nostra ricerca) a *semantico* (i motori di ricerca saranno in grado di *comprendere* che cosa stiamo cercando). La connettività si espanderà a livelli inimmaginabili: a oggi, la comunità Facebook conta circa 2.6 miliardi di utenti. Da un punto di vista astratto, questa massa apparentemente informe di contatti che si scambiano continuamente messaggi sotto forma testuale e visiva (includiamo in questo termine non solo le foto, ma anche i like e gli emoticon che esprimono il nostro accordo e stato emotivo) trascende l'intelligenza del singolo per diventare collettiva, in una specie di compenetrazione digitale.

Veniamo ora agli esponenti della parte avversa, ovvero coloro che ritengono che il web diminuisca la nostra intelligenza (cioè ci renda più stupidi). Molti insegnanti si lamentano di come gli studenti stiano perdendo la capacità di pensare in modo autonomo: la frase che si sente spesso è: «L'ha detto Internet!», come se qualsiasi cosa, per il solo fatto di essere presente sul web, sia automaticamente vera e libera da ogni giudizio critico. Mentre la ricerca sulla famosa enciclopedia casalinga era a volte difficile (perché i testi erano sorpassati e occorreva andare in biblioteca, confrontandosi con altri testi, oppure perché il linguaggio asciutto, scientifico, non era sempre alla portata di tutti) e richiedeva un notevole lavoro di sintesi e giudizio critico per fare una bella figura in classe, oggi è sufficiente ricopiare meccanicamente quanto si trova in rete nel nostro sistema di videoscrittura. Non solo: se come diceva il filosofo austriaco Karl Popper la televisione è una cattiva maestra, Internet è un maestro confusionario. Poiché le pagine che troviamo in rete sono degli *ipertesti* (è possibile, cioè, saltare da una pagina a un'altra cercando un riferimento o un approfondimento), è facilissimo perdersi senza riuscire a ricordarsi da dove eravamo partiti. Inoltre, c'è molto da dire sulla qualità dell'informazione: non essendo soggetta a nessun tipo di regolamentazione, la rete ospita enormi isole di disinformazione (informazioni non verificate), alimentando ignoranza, mancanza di senso critico e teorie complottiste o antiscientifiche (come l'affermare che la Terra è piatta).

Che cosa è, in conclusione, che ci rende più intelligenti? Se l'intelligenza è la risposta a uno stimolo (che può essere sociale, culturale o naturale), è automatico pensare che la mancanza di stimoli – intesa come una vita spesa a ripetere meccanicamente gli stessi atti, al punto che tutte le giornate sembrano uguali – non possa che danneggiare la nostra intelligenza. Nello studiare i problemi dell'invecchiamento, la geriatria ci raccomanda di variare il più possibile la nostra quotidianità: uscire con gli amici, leggere un buon libro, praticare uno sport, intraprendere un hobby e così via.

Un esercizio intellettuale molto stimolante consiste nell'osservare l'intelligenza al di là del reame umano: capire, in altre parole, come essa si esprime negli animali. Quante volte ci soffermiamo a guardare il nostro gatto o il nostro cane per stupirci del loro comportamento? Per esempio, i nostri amici felini elaborano complesse strategie per prendersi il posto più comodo nell'ambiente domestico o per richiedere quel cibo particolare che fa sì che emettano le tipiche fusa. In modo del tutto simile, il nostro cane gioca volentieri con noi fino ad esprimere comportamenti che non esiteremmo a definire come umani. Da tempo, gli scienziati studiano l'intelligenza e il comportamento del regno animale raggiungendo risultati sorprendenti. Alcuni orangutan, ad esempio, sono in grado di sistemare una serie di scatole in modo da raggiungere il casco di banane appeso al soffitto. Questo ci dice molte cose, a cominciare dal fatto che gli orangutan sono in grado di pianificare correttamente operazioni che permettono di risolvere casi di *problem solving*.

Un altro scenario, molto interessante, è il cosiddetto test dello specchio: l'animale che si vede riflesso è in grado di riconoscere sé stesso? La risposta è senz'altro positiva per alcune specie di orangutan. Ma se tali animali hanno una concezione del sé, sono in grado di sperimentare alcuni dei processi cognitivi fondamentali, come il dialogo interiore o addirittura la coscienza?

Dove si nasconde il problema nel perseguire questo tipo di studi? Nel fatto che, ancora una volta, il nostro cervello viene ingannato dal desiderio di attribuire al regno animale le stesse caratteristiche dell'intelligenza umana: giudichiamo gli animali, in altre parole, come se fossero simili a noi e pensassero come noi. Si tratta di un *bias* cognitivo ben conosciuto, dal quale è molto difficile liberarsi e che ci accompagna per la maggior parte della vita. Il problema è complesso e diventa insolubile se applicato su larga scala.

Nel 1972 e nel 1973, l'agenzia spaziale americana inviò nello spazio due sonde chiamate Pioneer 10 e Pioneer 11 destinate ad attraversare il sistema solare (entrambe sono ancora in viaggio, rispettivamente verso le costellazioni del Toro e dello Scudo). La speranza era che esse resistessero ai numerosi pericoli di un viaggio così lungo e, lanciate nello spazio profondo, entrassero – un giorno lontano – in contatto con una civiltà extraterrestre. La Nasa e il celebre scienziato americano Carl Sagan apportarono una modifica nella struttura delle sonde, aggiungendo una placca su cui era inciso un disegno. L'idea era di trasmettere un messaggio ad abitanti di altri sistemi solari, un po' come la famosa bottiglia gettata tra le onde dell'oceano per inviare un messaggio. La targa rivela un uomo e una donna, entrambi nudi. L'uomo ha il braccio alzato; i particolari anatomici sono abbozzati. Di sotto, compare una visualizzazione del sistema solare, con una freccia che parte dal terzo pianeta in ordine di distanza dal Sole (la Terra) e l'icona del Pioneer stesso che, ingrandita, si trova alle spalle dell'uomo e della donna. Si può notare una rappresentazione del periodo di 14 *pulsar* (corpi celesti che ruotano su se stessi a grande velocità) in forma di linee, codificate in numeri binari.

Con un volo ardito di fantasia, facciamo un esperimento mentale: ci metteremo nei panni dapprima di un essere umano del futuro (per fissare le idee, diciamo dell'anno 2500) e poi pretenderemo di essere un extraterrestre che vive nella costellazione del Toro. Nel primo caso, nel guardare la placca, notiamo subito l'uomo con il braccio alzato: per quanto ne sappiamo, potrebbe essere un saluto nazista, o forse una deformazione del braccio dovuta all'artrite o l'indicazione di fermarci. La nostra attenzione andrebbe immediatamente al fatto che le due figure sono stilizzate e non completamente definite anatomicamente, il che ci lascerebbe supporre (forse) che le due figure ritraggono delle bambole. Guarderemmo poi la rappresentazione del sistema solare: nel 1973 esso aveva ben 9 pianeti, ma partire dal 2006, l'Unione Astronomica Internazionale, con regolare votazione, ha declassato Plutone riducendolo ad asteroide. È inevitabile pensare che gli umani del futuro potrebbero guardare la placca senza capire di che cosa si tratta.

Le cose sarebbero indubbiamente peggiori per un ipotetico extraterrestre che, in primo luogo, potrebbe non essere dotato di occhi (potrebbe essere una nuvola di gas o una pianta o una specie di minerale). Ma anche se lo fosse, potrebbe interpretare la placca come dei ghirigori privi di senso, magari causati dallo sfregamento di minuscole particelle lungo la placca durante il lungo viaggio. Ammettiamo pure – ed è una grossa forzatura – che il nostro alieno abbia un senso artistico e abbia compreso che la placca è un messaggio. Come potrebbe comprenderlo? E poi, in quale senso si legge la placca? Per esempio, se essa fosse vista in modo da essere capovolta, il nostro alieno penserebbe che la nostra testa parta dai piedi! I commenti potrebbero essere persino più aspri (perché l'uomo e la donna hanno tratti europei? Perché l'uomo viene prima? Perché la donna non alza il braccio? Alzare il braccio è veramente un segno di saluto in tutte le culture?).

Se l'intelligenza ha un limite, qual è? Come possiamo capire quando sarà stato raggiunto? Alcuni filosofi della mente (come l'americano Jerry Fodor) sostengono che il nostro cervello non è stato costruito per essere libero di pensare qualsiasi cosa: da quanto abbiamo detto, se è improbabile che il nostro cane capisca che cosa sono i *numeri primi*, è altrettanto plausibile che vi siano delle cose ovvie per il nostro amico a quattro zampe che sono per noi inesplicabili. A un ordine di magnitudine più alto, non possiamo fare a meno di sospettare che vi siano aspetti della realtà che ci circonda che non potremo mai comprendere. Pensiamo ai daltonici, che non vedono correttamente i colori, o i non vedenti, che sviluppano sensi complementari alla vista altrimenti sopiti. In modo del tutto simile, i nostri occhi non possono cogliere la radiazione infrarossa né il nostro udito può percepire gli ultrasuoni. È quindi plausibile che forme avanzate di ragionamento astratto, come la matematica e la logica, dipendano fortemente dallo sviluppo delle nostre sinapsi. Esseri dotati di cervelli organizzati in questo modo potrebbero aver sviluppato astrazioni profondamente diverse dalle nostre. A una percezione del mondo, per forza di cosa, dipendente da sensi imperfetti che forniscono informazioni incomplete, si accompagna il limite fisico del nostro cervello.

Negli anni ’60 era molto in voga una teoria che considerava la mente come un processo computazionale: il cervello veniva considerato una specie di hardware (una macchina fisica, in questo caso basata su complessi scambi biochimici, che produce persino un debole segnale elettrico) mentre la mente – e l’intelligenza – veniva identificata con il software, cioè un insieme di algoritmi dedicati a compiti diversi: le emozioni, il linguaggio, il riconoscimento di volti e così via. La teoria venne abbandonata vent’anni dopo, a partire da uno dei suoi fondatori, il filosofo Hilary Putnam. Sebbene il tema continui ad essere al centro di un dibattito assai animato, sembra che il nostro cervello e i pensieri che ne scaturiscono, non siano il risultato di un processo computazionale (il premio Nobel Roger Penrose sostiene che si tratti di un processo *quantistico*). Detto diversamente: il nostro cervello continua ad essere una cosa non compresa completamente, ma ci sono buone ragioni per pensare che non funzioni come un calcolatore.

Recenti ricerche hanno aperto una strada assai curiosa. Se è vero che il nostro intestino contiene milioni di cellule e fibre neuronali che costituiscono un vero e proprio sistema nervoso autonomo, si può parlare di *secondo cervello* oltre a quello contenuto nella scatola cranica. Vi è certamente un dialogo tra i due che avviene tramite il sistema psico-neuro-immuno-endocrino, al punto che lunghi periodi di stress – dovuti all’iper-lavoro, ad esempio – comportano fenomeni infiammatori della mucosa intestinale. Allo stesso modo, l’intestino provoca un aumento della serotonina, quell’ormone che ci mette di buonumore anche se non sappiamo perché. Verrebbe da dire che se l'intelligenza emerge dal nostro cervello, il nostro intestino non può che originare buon senso.

Intelligenza meccanica

«Se ci si aspetta che una macchina sia infallibile, allora non può essere anche intelligente». Alan Mathison Turing, considerato il padre dell'informatica e dei moderni calcolatori elettronici, diceva questo in un seminario del 1947 tenuto presso la London Mathematical Society. Il caro Turing, venerato e odiato forse in egual misura dalla comunità scientifica e da generazioni di studenti di informatica (le dimostrazioni dei teoremi di informatica teorica mettono ancora i brividi a tanti di loro!), in poche parole condensava una correlazione fondamentale tra i concetti di macchina, di intelligenza e di *errore*. L'intelligenza, prerogativa biologica come abbiamo visto finora, veniva accostata a qualcosa di *meccanico* (una macchina), e allo stesso tempo le si associava una caratteristica ben precisa: quella di poter *sbagliare*! «Errare humanum est», dice una massima latina di dubbia attribuzione, che suona familiare alle nostre orecchie forse perché ripetutaci da nostro nonno o nostra madre fin da quando eravamo piccoli (non è chiaro se per giustificare i nostri sbagli da più o meno ingenui bambini… o i loro da adulti).

Siamo dunque intelligenti perché sbagliamo? E tutto ciò che commette errori è dunque intelligente? Stiamo sempre molto attenti a non derivare un falso sillogismo dall'affermazione iniziale; è evidente che un orologio che segna un'ora diversa da quella attuale (dice l'ora 'sbagliata'), un trapano con il mandrino fuori asse (che perfora in modo 'sbagliato' il muro), o un essere della nostra specie (perlopiù maschile) che per la quinta volta di seguito non riesce ad annodare in modo corretto la propria cravatta davanti allo specchio (produce un nodo 'sbagliato'), sono entità piuttosto diverse tra loro e almeno due su tre non si direbbe siano dotate di intelligenza (si potrebbe dibattere che in alcuni casi anche tre su tre in effetti).

Vi è invece una conseguenza chiara e indubbiamente importante dell'affermazione di Turing: un apparecchio meccanico che non commette errori non possiede l'intelligenza. Analizzando il soggetto di questa frase, potrebbe sembrarci scontato che un qualcosa di non biologico, un congegno basato su dei meccanismi, non sia per natura fornito della connotazione di intelligenza in quanto pensiero critico e consapevolezza di sé: proprio come l'orologio o il trapano. Tuttavia, da più di quattromila anni a questa parte abbiamo realizzato e ci siamo via via circondati di strumenti in grado di *supportarci* e progressivamente *sostituirci* nello svolgimento di compiti e operazioni strettamente connessi ad attività proprie di creature intelligenti, come il calcolo matematico. E per poter far ciò con l'efficacia e la precisione richieste, per l'appunto, dalla inflessibile matematica, li abbiamo pensati e realizzati in modo tale che, limitatamente al loro compito e alla loro funzione, non commettessero 'errori'.

Pensiamo per esempio all'abaco, probabilmente lo strumento più antico creato dall'uomo come ausilio per eseguire operazioni matematiche quali l'addizione, la sottrazione, la moltiplicazione e la divisione, la cui presenza è rintracciabile fin dai Babilonesi del Duemila avanti Cristo. Nelle sue forme più 'moderne' diffusesi dal tardo Medioevo in poi, generalmente più vivide nel nostro immaginario, come l'abaco ad anelli (il *suanpan* cinese o il *soroban* giapponese, per esempio), è evidente come la rappresentazione di un certo numero data dalla posizione degli anelli lungo le asticelle è univoca e infallibile: quattro anelli delle unità spostati verso l'alto e l'anello che rappresenta il numero cinque spostato verso il basso in un *soroban* stanno inequivocabilmente rappresentando il numero nove. Inoltre, per come è stato costruito e per la *semantica* attribuitagli, ognuna delle sue asticelle con i propri anelli è certamente in grado di rappresentare tutti i numeri da 0 a 9, senza possibilità di 'errore'. Nel caso dell'abaco, stiamo tuttavia parlando di uno strumento manuale: in quanto tale, da un lato richiede l'intervento di un utilizzatore umano per 'funzionare', dall'altro gli unici errori che possono emergere sono quelli introdotti dall'utilizzatore stesso (come lo scambiare un numero per un altro).

Nel corso del diciassettesimo secolo, due scienziati e filosofi del calibro di Blaise Pascal e Gottfried Wilhelm Leibniz hanno inventato a poca distanza l'uno dall'altro due strumenti meccanici, rispettivamente la *pascaline* e la calcolatrice a scatti (comunemente chiamati, con grandissimo sforzo di fantasia, anche Macchina di Pascal e Macchina di Leibniz), in grado di svolgere *automaticamente* addizioni e sottrazioni la prima (gestendo opportunamente il riporto) e moltiplicazioni e divisioni la seconda (tramite addizioni e sottrazioni ripetute). Ci troviamo in questo caso davanti alle prime, rudimentali calcolatrici basate su congegni meccanici (ingranaggi, ruote, manopole ecc.), in grado di fornire, a meno di malfunzionamenti e guasti nei meccanismi stessi, il risultato *preciso* di calcoli matematici a più cifre di una certa complessità, che molti di noi avrebbero difficoltà a svolgere velocemente sia 'a mente' che su carta e penna, o la cui risoluzione da parte nostra porterebbe via molto più tempo e sarebbe soggetta a *errori*. È proprio l'introduzione di simili strumenti che inizia a tracciare una linea di confine tra le *capacità* biologiche della mente umana e quelle, in questo contesto, *meccaniche*, che strumenti da lei stessa ideati cominciano a possedere. Ce lo dice Leibniz stesso a parole proprie a proposito della sua 'macchina': essa è stata pensata per eseguire operazioni in modo *leicht, geschwind, gewiß* (facile, veloce e affidabile), in contrapposizione con la difficoltà, lentezza e possibilità di errore che caratterizzano la sua controparte organica.

Due secoli più tardi, il Motore Differenziale e successivamente il Motore Analitico progettati dal matematico Charles Babbage, congegni meccanici inizialmente pensati per eseguire calcoli matematici molto più complessi come i logaritmi e le funzioni trigonometriche, spostano ulteriormente l'asticella relativamente a ciò che una macchina può essere in grado di fare, arrivando alla possibilità per un meccanismo ideato dall'uomo di eseguire interi algoritmi e procedure condizionali e cicliche. Ada Lovelace, traducendo e annotando un articolo di Luigi

Menabrea a proposito del Motore Analitico di Babbage, descrive un metodo teoricamente corretto e concreto per far calcolare a quest'ultimo una sequenza dei numeri di Bernoulli, facendola diventare in qualche modo precursore della futura professione di programmatore informatico del ventesimo secolo. Sebbene il Motore Analitico non sia stato mai concretamente costruito, la sua teorizzazione e l'espressività permessa dal 'linguaggio' in cui le procedure avrebbero potuto essere definite, sfruttata da Lovelace nella definizione del suo algoritmo, ci trainano verso un mondo in cui strumenti meccanici possono arrivare a svolgere *al posto dell'uomo* calcoli e compiti 'intellettuali' che solo esseri intelligenti fino ad allora avrebbero potuto fare. Anzi, ci proiettano ancora più in là: verso una realtà in cui macchine sono capaci di svolgere tali compiti *meglio* di esseri intelligenti, con maggiore velocità, potenza computazionale ed efficacia (di nuovo, senza *errore*) rispetto a quanto l'intelligenza umana permetta.

In fondo, tanti altri strumenti, apparecchi, 'macchinari' inventati dall'uomo nei secoli hanno permesso di svolgere compiti e attività in modo superiore e migliore rispetto a quanto l'uomo potesse fare (l'aratro, la ruota, gli occhiali, il microscopio…); ma tali strumenti hanno principalmente riguardato attività correlate alle capacità sensoriali dell'essere umano, come la vista, la forza muscolare, la velocità e così via. Nel nostro caso, stiamo parlando di congegni che interessano i suoi aspetti cognitivi, le astrazioni del calcolo e in generale i prodotti del pensiero, sebbene dal punto di vista di chi li ha creati possano apparire anch'essi nient'altro che ulteriori invenzioni umane.

L'abaco è dunque intelligente? Diremmo facilmente di no, ma forse principalmente per il fatto che nel suo caso, oltre tutto, manca la connotazione di *automatico*, cosa che intuitivamente lo rende ai nostri occhi un mero strumento e nient'altro. Allo stesso modo, le macchine concrete di Pascal e Leibniz e il teorizzato Motore Analitico di Babbage possiamo dire che siano intelligenti? In questo caso, la risposta potrebbe non essere così immediata. In fondo, questi congegni meccanici hanno compiuto un drammatico passo in avanti rispetto all'abaco: se opportunamente *configurati* e con i corretti *parametri di ingresso*, possono fornire *automaticamente* (cioè senza ulteriore intervento umano) risultati e *dati* che noi stessi potremmo non essere in grado di ottenere anche in un tempo maggiore. L'intelligenza umana, biologica, sembrerebbe perdere contro di loro in tale competizione. Nonostante ciò, sono le parole della Lovelace stessa, definita con grande stima da Babbage «L'Incantatrice del Numero», che ci aiutano a fare chiarezza in merito: «la macchina (il Motore Analitico) non ha la pretesa di *originare* alcunché: è in grado di fare qualunque cosa che noi sappiamo *ordinarle* di fare». Ordinare, ovvero fornire quell'insieme costituito dai *parametri di ingresso* e dalle *configurazioni* di cui parlavamo. La Lovelace, dicendo questo, associa implicitamente all'intelligenza (umana, biologica) la capacità di *produrre* qualcosa di *nuovo*, di predire *nuove* relazioni, di ipotizzare e giungere a *nuove* verità; la macchina, per quanto brava e veloce sia nelle operazioni matematiche, non essendo capace di far ciò non è da considerarsi, secondo tale ragionamento, intelligente.

Produrre novità, per la geniale Lovelace; commettere errori, per il buon Turing. Le capacità computazionali e risolutive dei congegni meccanici, la loro apparente *intelligenza meccanica*, sembra caratterizzarsi dall'essere sprovvista di queste due prerogative umane. Eppure, è lo stesso Turing che discute e prova ad approfondire la spinosa questione nelle sue produzioni scientifiche tra gli anni '30 e gli anni '50 del ventesimo secolo. A partire dal seguito stesso della frase che ha aperto questa trattazione e che lega l'infallibilità alla non-intelligenza: «Ci sono teoremi matematici che dicono esattamente questo. Ma questi teoremi non dicono nulla su quanta intelligenza può essere mostrata da una macchina che non si prefigge di essere infallibile». Una macchina, dunque, che possa commettere errori, che si assuma dei rischi anche a fronte di evidenze contrarie, o che possa *volutamente fingere di sbagliare* al fine di essere scambiata per un essere biologico, intelligente, se tale fosse il suo obiettivo.

Come può una macchina far ciò? I congegni di Pascal, di Leibniz, e anche i progetti di Babbage semmai fossero stati implementati come si deve, se commettessero errori nei loro calcoli per guasti agli ingranaggi o per un'impropria configurazione, diremmo che *non funzionano* come dovrebbero, essendo pensati per svolgere tali calcoli con la precisione matematica che l'uomo tendenzialmente non avrebbe. No, in questo caso stiamo parlando di una macchina ben diversa da quelle: una macchina potenzialmente in grado di dare risposte a problemi ben più articolati, di fornire *nuovi* contributi a detti problemi, e nel far questo mostrare margini di errore, adattandosi e via via *imparando* dai propri sbagli. Una macchina, dunque, che possa palesare *meccanismi* simili a quelli che permettono all'uomo di *pensare*.

Un anno dopo aver pronunciato tali parole, nell'articolo *Intelligent Machinery* del 1948 Turing discute proprio dei modi in cui i macchinari potrebbero mostrare un comportamento intelligente, sostenendo che, così come per gli esseri umani è l'educazione a ricoprire un ruolo fondamentale nello sviluppo delle loro potenzialità intellettive, allo stesso modo si potrebbe applicare un analogo processo di insegnamento rivolto alle macchine, sottolineando un'analogia tra la corteccia cerebrale di un infante e una macchina non organizzata che deve essere *addestrata*. Tuttavia, la conclusione di quell'articolo lascia spazio al ruolo della soggettività, dovuta al nostro stato mentale e alla nostra conoscenza di un certo oggetto o dominio, nel considerare 'intelligente' o meno una determinata macchina: chi riesce a 'sgamare' i sottesi meccanismi che la regolano e la fanno agire difficilmente le riconoscerebbe il connotato dell'intelligenza.

È nel suo articolo più noto e più influente, datato 1950 e paradossalmente (ma col senno di poi neanche troppo!) pubblicato su una rivista non di ingegneria ma di filosofia, intitolato *Computing Machinery and Intelligence*, che Turing tira le somme del suo pensiero riguardo agli annosi temi (calcolo, macchine, intelligenza) e ci lascia considerazioni, ma soprattutto ulteriori domande scientifico-filosofiche, sul rapporto tra essere umano, macchina e pensiero. Può una macchina pensare? Per Turing tale questione si trasforma in un'altra domanda: è possibile per una macchina ingannare un operatore umano in un gioco (l'*Imitation Game*, che è stato anche usato come titolo di un recente lungometraggio cinematografico sulla vita di Turing) in cui si deve indovinare il genere (maschile/femminile) di due giocatori attraverso una serie di domande, spacciandosi per uno di essi?

È proprio qui che ci si avvia a superare la concezione che fino a questo momento avevamo di meccanismo e di invenzione umana, tracciando una linea di demarcazione netta tra le capacità fisiche, sensoriali, e quelle intellettive, cognitive, di un essere della nostra specie. Non importa quanto si possa dare a una macchina l'aspetto, le sembianze e le caratteristiche fisiche di un *Homo Sapiens Sapiens*, come organi, arti, occhi e pelle *artificiali*, allo sguardo identici in tutto e per tutto a quelli che la natura ci ha fornito: ciò non renderebbe *più umana* una macchina che non fosse in grado di mettere in atto quell'insieme di processi in cui si generano novità, si commettono errori e si apprende da tali errori che è proprio di come la nostra stessa mente funziona.

Un essere meccanico, *artificiale*, che Turing già si prefigurava nel '50 e che generazioni di autori di fantascienza hanno ipotizzato e introdotto nelle loro opere fino ai giorni nostri, come in capisaldi del genere quali *Blade Runner* e *Ghost in the Shell*, può perciò arrivare a essere considerato intelligente a prescindere dal suo sembiante, dagli arti cibernetici, dalla sua pelle in resina o dai suoi muscoli in lega d'acciaio. Questo perché, anche in presenza di tutti questi elementi, quell'essere potrebbe rimanere un mero guscio vuoto, in grado magari di eseguire alla perfezione ordini senza mai sbagliare o porsi domande (come le prime generazioni di replicanti di *Blade Runner*). Parimenti, soldati diventati più macchine che uomini nell'aspetto così come nei meccanismi sensoriali (si pensi a *Robocop*, ma anche a Briareos di *Appleseed*), o persone nelle quali non solo il corpo, ma perfino il cervello è stato sostituito da un *cyber-brain* (come il maggiore Motoko Kusanagi in *Ghost in the Shell*), potrebbero continuare a essere considerati *intelligenti* e *umani* perché ancora dotati, nonostante tutto, di quei connotati di intelligenza che abbiamo fin qui ripetutamente elencato.

Per Pascal, Leibniz, Babbage e Lovelace, tali questioni andavano forse al di là persino del più visionario e onirico dei propri pensieri. Per Turing, cominciano ad assumere l'aspetto di scenari futuristici e futuribili, ma ipotizzabili nel giro di decine di anni e su cui valeva la pena iniziare a riflettere e ragionare. Prima di lui, le macchine, e l'intelligenza meccanica, che abbiamo visto essere una forma meramente apparente e certamente incompleta di quella associata agli esseri umani, avevano avuto delle connotazioni ben precise e circoscritte in quanto strumenti a supporto e vantaggio degli uomini.

È da Turing in poi, a valle di quelle stesse domande e di quegli stessi interrogativi che si poneva e che poneva ai suoi contemporanei e posteri, che il concetto di macchina, di meccanico, e il dilemma di potervi associare o meno aggettivi quali *intelligente* e *pensante*, aprono la strada alla possibilità di realizzare qualcosa che vada oltre meccanismi fatti di leve e ingranaggi. Una strada solcata dall'avvento dei calcolatori elettronici e dal loro funzionamento sempre meno meccanico e tangibile, che hanno rivoluzionato ogni concezione di macchina e di limiti ad essa associati come forse solo una mente geniale come quella di Turing avrebbe potuto ipotizzare. Una strada che, nel corso dell'ultima metà dello scorso secolo e in questo primo ventennio dell'attuale, ha portato all'ideazione e al concepimento di una realtà che fortemente solletica l'interesse della scienza odierna e che ha turbato e continua tuttora a turbare e sconvolgere i sogni della fantascienza di ieri e di oggi: quella dell'*intelligenza artificiale*.

Intelligenza artificiale

«L'Intelligenza Artificiale sarà la più importante conquista dell'uomo; peccato che potrebbe essere l'ultima». Questo pensiero di Stephen Hawking, che è stato uno dei più grandi fisici teorici contemporanei, meraviglia e inquieta allo stesso tempo. In effetti, a partire da autori come Karel Čapek e Isaac Asimov in avanti, il tema dell'Intelligenza Artificiale (IA) ha affascinato e inquietato milioni di persone. Oggi viviamo una stagione in cui molte delle applicazioni che fino a ieri erano relegate alla fantascienza sono diventate realtà, ed è difficile, a volte anche per gli addetti ai lavori, distinguere i reali progressi tecnologici dalle speculazioni. Come se non bastasse, ad alimentare la confusione è entrato in gioco anche il marketing: infatti, ogni nuovo prodotto o servizio tecnologico deve forzatamente essere dotato di IA per essere (o sembrare) innovativo. Di conseguenza, spesso si parla di IA anche quando questa, in effetti, non c'è. Ma cos'è l'intelligenza artificiale?

Il termine si riferisce alla capacità delle macchine – in genere robot, non necessariamente umanoidi – di *ragionare* e *comportarsi* come gli esseri umani. Oggi ci si riferisce a tale affascinante idea con il termine IA *generale* o *completa* e, almeno per ora, rimane qualcosa (per alcuni versi per fortuna!) di lontano dalla realtà. In ambito più propriamente scientifico, essa è una disciplina vasta, che si basa su un concetto fondamentale dell'informatica: quello di *algoritmo*, cioè una serie di istruzioni che vengono eseguite in modo sequenziale da un calcolatore, applicate a dei dati in ingresso ('input') e producendo dei risultati ('output'): per esempio, dati due numeri, vogliamo calcolare e stampare il valore della loro somma. Si può parlare di IA quando l'algoritmo è più complesso ed è chiamato a intraprendere azioni in situazioni di incertezza: per esempio, immaginando uno scenario in cui alcune telecamere e sensori installati su un'automobile forniscono un flusso di dati che viene utilizzato per la guida autonoma. L'output dell'algoritmo è molto più profondo rispetto al caso precedente, in quanto è necessario accelerare, frenare, sterzare, cioè… guidare.

In realtà, un'IA che segue fedelmente le istruzioni di un programma per guidare un'automobile («quando vedi uno stop, fermati», «non superare il limite di velocità» e così via) non ci stupisce così tanto: anzi, saremmo tentati dall'obiettare che, dopotutto, di intelligente non ci sia molto. Tuttavia, da alcuni anni sono emerse nuove tecniche per definire algoritmi meno rigidi, che riflettono più da vicino le modalità dell'apprendimento umano. Ricordando che ciascuno di noi apprende dai propri errori, è oggi possibile creare programmi che imparano dall'esperienza grazie a una disciplina chiamata *machine learning* ('apprendimento automatico'). In questo contesto, il programmatore non specifica in modo esaustivo alla macchina che operazioni fare, ma fornisce esempi di input e di corrispettivi output desiderati. L'algoritmo modifica automaticamente il proprio comportamento sulla base degli esempi forniti, così come accade in un processo di apprendimento, fino ad eccellere (o quasi) nel compito per cui è stato predisposto.

Negli ultimi anni si è assistito a un grande sviluppo di queste tecniche, con risultati notevolissimi in alcuni ambiti, quali ad esempio: il riconoscimento di immagini e del parlato; il riconoscimento del linguaggio naturale; l'abilità di sfidare un essere umano nei giochi da tavolo (senza dimenticare i *videogame*); i già citati veicoli a guida autonoma e così via.

I primi decenni del 2000 avevano visto il ritorno del cosiddetto paradigma connettivista, una simulazione dei neuroni e delle sinapsi umane, nonché dei meccanismi di apprendimento risultanti. Nonostante le reti neurali siano state trascurate nel secolo scorso (due ricercatori americani, McCulloch e Pitts proposero un modello di neurone già nel lontano 1943, lavoro che fu esteso più avanti da Rosenblatt con scarsi risultati), dall'ultimo ventennio conoscono una nuova giovinezza, grazie a un nuovo approccio chiamato *deep learning* ('apprendimento profondo') in cui una rete neurale è formata da più strati (ciascuno dedicato a un particolare compito) che riflettono più da vicino la conoscenza che abbiamo oggi del cervello umano.

Se i traguardi raggiunti dall'IA sono notevoli, numerose sono le obiezioni e i problemi che essa ha sollevato. In ambito filosofico e psicologico, essa è stata bersaglio di critiche fin dalla sua nascita: in che senso un computer può essere definito intelligente? Una macchina può essere *autocosciente*? Il filosofo americano John Searle pensa di no, e lo dimostra con un semplice esperimento mentale: mettiamo una persona dentro una stanza con due finestre, dando in dotazione un libro che spiega come associare, ad ogni ideogramma cinese, una parola della lingua inglese. Dall'esterno, qualcuno immette un foglio contenente alcuni ideogrammi: la persona all'interno della stanza codifica il documento, grazie al libro, e produce la traduzione in lingua inglese, che mette a disposizione utilizzando la seconda finestra. Sempre dall'esterno, si direbbe che 'la stanza' capisca il cinese, perché ne effettua la traduzione in lingua inglese.

Searle nega che questo sia vero: la persona all'interno della stanza non conosce affatto il cinese (né, probabilmente, l'inglese), si limita ad effettuare una semplice manipolazione simbolica, come del resto accade a chi si è trovato ad espletare un lavoro alienante, di cui non capisce né senso né scopo. Il giudizio di Searle non cambia nel caso delle reti neurali, in cui ogni neurone artificiale non sarebbe altro che una minuscola 'stanza cinese'.

La complessità dei moderni algoritmi dell'IA è tale che risulta difficile riuscire a capire perché un programma abbia fornito una certa risposta: è il problema (aperto) della trasparenza. A questo interrogativo se ne aggiungono altri, anche etici: nella moderna società dell'informazione molte operazioni, decisioni e scelte tradizionalmente affidate alle persone sono sempre più delegate ad algoritmi. Tali algoritmi possono consigliare, se non addirittura decidere, come i dati devono essere interpretati e quali azioni dovrebbero essere intraprese di conseguenza. Esempi di algoritmi di *decision-making* includono: algoritmi di profilazione e classificazione che determinano come individui e gruppi vengono formati e gestiti; sistemi di raccomandazione che offrono agli utenti indicazioni su quanto e come esercitarsi, cosa acquistare, quale strada prendere e chi contattare; social media che mediano il modo con cui si accede alle informazioni e ai contenuti con algoritmi di personalizzazione e filtraggio, fino ad arrivare alle cosiddette *armi autonome*.

La delega da uomo ad algoritmo, irrinunciabile dal punto di vista dello sviluppo tecnologico e positiva per molti aspetti, comporta anche risvolti problematici che devono essere considerati con attenzione, perché l'impatto che gli algoritmi possono avere sulla vita degli esseri umani è molto forte e si tratta di una novità storica. Per questo motivo, sia in ambito scientifico che in quello politico è molto acceso il dibattito relativo alla regolamentazione degli algoritmi e più in generale intorno al loro uso etico (cfr. Mittelstadt, 2016). Tra le numerose dimensioni su cui si sviluppa tale dibattito ricordiamo: il tema della responsabilità giuridica derivante dall'azione nociva di un robot o di un algoritmo; il già citato tema della trasparenza, cioè il requisito che l'utente finale (umano) possa comprendere come è stata presa una decisione o una previsione da un algoritmo; il tema dell'equità, secondo cui, in certi contesti, la decisione dell'algoritmo non deve essere basata su dati sensibili come sesso, età ed etnia, e infine il tema della deontologia degli sviluppatori degli algoritmi.

Questi ultimi, combinati con la straordinaria diffusione del digitale a cui stiamo assistendo nel nostro tempo, sono strumenti potentissimi, in grado di trasformare la società e gli individui. Tuttavia, nella nostra società occorre interrogarsi con attenzione sulla natura e sulle conseguenze di tale fenomeno: aspetti che vanno ben al di là del campo scientifico-tecnologico e che devono essere affrontati attraverso una riflessione e un dialogo apertamente transdisciplinare.

Siamo sicuri di voler proseguire su questa strada? Siamo sicuri che il progressivo avvicinarci a quell'idea dell'*intelligenza artificiale completa* non scandisca parimenti gli ultimi rintocchi della razza umana, così come Hawking aveva previsto? Nel momento in cui la nostra specie smettesse di essere l'unica depositaria di un'intelligenza dominante sul nostro pianeta, e venisse in questo affiancata da una o più entità tra l'altro create dagli esseri umani stessi, il rischio per noi di arrivare a essere considerati superflui e rimpiazzabili potrebbe non essere poi così lontano. D'altro canto, se delle macchine, che come abbiamo visto sono già in grado, con le loro capacità meccaniche, di svolgere molti compiti più velocemente e più efficacemente dell'uomo, arrivassero ad essere dotate di un concetto di intelligenza anche soltanto paragonabile a quella biologica umana, le cose potrebbero mettersi piuttosto male per le 'scimmie senza peli'.

Questo perché le macchine, affrancate della deteriorabilità che caratterizza per loro natura gli esseri biologici, organici, qualora pervenissero alla consapevolezza di sé e della loro superiorità in molteplici ambiti dell'esistenza, potrebbero senza troppa meraviglia da parte nostra dichiarare la specie umana come un qualcosa di cui si potrebbe fare a meno, o addirittura di dannoso (come in effetti per alcuni versi lo è) per il pianeta stesso in cui ci troviamo. Ecco dunque che scenari distopici quali il sistematico genocidio degli esseri umani o la loro trasformazione in fonti energetiche da sfruttare (come accade nell'ormai iconico film di fantascienza *The Matrix*, ad esempio), alla mente non solo dei più visionari, ma anche di chi, come Stephen Hawking, abbia una profonda consapevolezza delle caratteristiche e dei limiti dell'intelligenza umana, si palesano come potenziali e terrificanti conseguenze del giungere a quell'IA completa che per ora sembra ancora un miraggio.

Naturalmente, non vi è alcuna certezza in merito. Nessuno sa cosa succederebbe davvero qualora ci arrivassimo, e quante possibilità positive di collaborazione reciproca e coesistenza siano più o meno realistiche rispetto agli incubi di Hawking e di una buona quantità sia di scienza che di fantascienza. È la natura stessa del pensiero e dell'intelligenza che ci fa permanere in questo dubbio: proprio come non possiamo prevedere il comportamento di un nostro simile, di un amico, di un vicino, di un concittadino, di un presidente, allo stesso modo esseri intelligenti non possono presumere di sapere cosa altri esseri intelligenti, anche se artificiali, penseranno e faranno a parità di dati e di condizioni.

In fondo, se fosse prevedibile, non sarebbe intelligenza.

Bibliografia

M. AMIN - M. BURGHARDT, *A Survey on approaches to computational humor generation*, in «Proceedings of the 4th Joint SIGHUM Workshop on Computational Linguistics for Cultural Heritage, Social Sciences, Humanities and Literature», 2020.

D. ANDERSON, *Imagining the internet survey asks: Is Google making us stupid?*, https://www.elon.edu/u/news/2010/02/24/imagining-the-internet-survey-asks-is-google-making-us-stupid/, 2010.

D. BERNAZZANI, *The Soroban / Abacus Handbook*, Rev 1.05, 2005. http://totton.idirect.com/soroban/THE%20ABACUS%20HANDBOOK.pdf

G. GALLUP jr, *Chimpanzees: Self-recognition*, in «Science» vol. 167, issue 3914, 1970.

P. PHEMISTER - S. BROWN, *Leibniz and the English-Speaking World*, Springer, 2007, https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4020-5243-9.

Mechanical intelligence, Collected works of Alan M. Turing, Elsevier Science Publishers, 1992.

L.F. Menabrea - A. Augusta, *Countess of lovelace (translator). Sketch of the analytical engine, with notes upon the memoir by the translator*, Bibliothèque Universelle de Genève, october, n. 82, 1842, http://www.fourmilab.ch/babbage/sketch.html
B.D. Mittelstadt - P. Allo - M. Taddeo - S. Watcher - L. Floridi, *The ethics of algorithms: Mapping the debate*, in «Big Data & Society», 2016.
R.Z. Pearlman, *Kickstarter project seeks to resurrect pioneer plaques*, in «Scientific American», 5, 2017.
R. Perrault et al., *The AI Index 2019 Annual Report*, AI Index Steering Committee, Human-Centered AI Institute, Stanford University, Stanford 2019.
R. Rosentzweig, *Can history be open source? Wikipedia and the future of the past*, 2006, https://rrchnm.org/essay/can-history-be-open-source-wikipedia-and-the-future-of-the-past/
Turing, *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, https://plato.stanford.edu/entries/turing/

Finito di stampare
nel mese di novembre 2021
da Litografia Solari
Peschiera Borromeo (Mi)