

Creatività, probabilità, frequenze: le tecnoscienze ed il vivente

Giuseppe Longo

Centre Cavaillès, RdS, CNRS – Ecole Normale Supérieure, Paris

Sunto Cercheremo di distinguere fra scienza e tecnoscienza, fra la definizione data con rigore e la sua completa descrizione con sequenze alfa-numeriche finite. Come definire la “produzione di novità” evolutiva e simbolica, storica, “la creatività”? Come cogliere “il gesto costruttivo” nella prova matematica e farne una codifica numerica? La creatività può esser definita in teoria della calcolabilità, ma ci dà un’immagine sempre aperta del calcolo, catturata male da probabilità basate su frequenze passate. Si proverà ad esplicitare i principi che governano, spesso implicitamente, le tecnoscienze, puntando a direzioni di lavoro che mirano a re-inventare le attività umane in rete.

Scienza e tecno-scienza

Non posso dare una definizione di scienza. La scienza è una pratica storica, è il risultato di una storia, è sempre « prospettica », ma costruisce oggettività ed anche “oggetti” di conoscenza, “ritagliando” e qualificando, definendo gli osservabili pertinenti. La scienza è tanto più oggettiva, come costruzione di conoscenza, quanto più è un sapere critico; quando nasce da un raffronto di prospettive, da cambiamenti di prospettiva. E tale sapere, per esser critico, deve esplicitare principi di conoscenza, fare un passo di lato, dibatterne, saperne capire i limiti, fino a riuscire a dare, come è accaduto in matematica ed in fisica, dei “risultati negativi”, ovvero dimostrare limiti intrinseci di una proposta di conoscenza (Longo 2023). Questi sono elementi di una etica interna alla scienza che permettono di correlarla all’etica sociale e politica di una democrazia, ancorata alla esplicitazione critica di principi, quali quelli dello stato di diritto. Non posso quindi dare una definizione di scienza ma farne una storia, per di più sommaria e nostra, ben diversa da altre culture, una storia che mi permette tuttavia di dedurre delle proprietà, come quelle più su, sufficientemente robuste.

Non posso neppure dare una definizione di “tecnoscienza”, pure questa una costruzione storica, anzi radicata nella contingenza politica, senza neppure il respiro della “storia” proprio alla scienza, ma posso individuarne alcune proprietà ricorrenti:

- lasciare nell’ombra alcuni principi chiave (ad esempio, in *IA*, non parlare del funzionamento imperativo dei sistemi operativi, basato sull’iterazione) o, addirittura, assumerne di notoriamente falsi (il *Dogma Centrale* della biologia molecolare), dicendo: “sì, sì... so che è più complicato di così” (Fox-Keller 2020) – e questo esclude ogni dibattito critico;

- dire che non si hanno limiti a quel che si può fare, cumulando tecniche: con l’*IA* possiamo raggiungere ed andar oltre la cognizione animale ed umana; con le *New Genetic Technologies*, abbiamo “the power to control evolution” (Doudna, 2017).

Non posso dunque caratterizzare in generale scienza e tecno-scienza, ma posso distinguerle, oggi in particolare, in modo contingente e quindi politico o politicamente rilevante. Rivolgendosi al passato od altrove, relativamente altre forme di conoscenza (la matematica di Liu Hui, III secolo, Cina, o la medicina cinese, ad esempio), si dovrebbe sviluppare un discorso diverso. Nel caso di queste due nostre tecno-scienze, la biologia molecolare geno-centrica e l’*IA*, entrambe convergono nel distruggere il senso *storico* e *contestuale* dell’organismo biologico e delle sue tardive costruzioni simboliche.

Creatività

Non potendo definire scienza, ma sapendo solo dare una storia possibile, la nostra per di più, ed alcuni criteri di analisi critica, in quanto costruzione di intelligibilità, non posso di certo definire “creatività”, neppure scientifica: un pratica storica sempre cangiante. Non mi azzardo ovviamente a parlare di “creatività artistica”, ovvero a parlare di “arte”: solo per discutere di un aspetto della originalità del Rinascimento italiano, l’invenzione della prospettiva pittorica moderna, bisogna sprofondarsi nella straordinaria inventività della Teologia medievale (Arasse 1999; Longo, Longo 2020). Tuttavia, posso proporre alcuni passaggi chiave, storici, della creatività matematica, per consentire un paragone con i tentativi in IA di definirla per “formalizzarla” (e, quindi, trasferirla nella macchine, ci dicono).

La pretesa in IA (“descrivimi con rigore la tua nozione di creatività ed io la formalizzo e la implemento, scrivendo così programmi per una IA creativa”), è infatti un “dèjà vu” nella storia della scienza ed in particolare in quella della matematica: definisci con rigore qualsiasi cosa, ed io formalizzo, calcolo. Il rigore coincide con o è sempre riducibile alla scrittura formale. E le nozioni di “formalizzare”, “implementare”, “calcolo”, “programma” sono eminentemente matematiche, meglio: aritmetiche.

Diceva Pitagora (VI s. AC): dammi una lunghezza con precisione, io te la misuro sempre con un numero intero od un rapporto di interi. *No, non si può*: la diagonale del quadrato, definita con rigore ed al centro del “logos” (un quadrato), non è definibile come rapporto di interi, è un a-logos.

Diceva Laplace (1800): dammi una definizione rigorosa di una dinamica fisica, con un sistema di equazioni differenziali. In buone condizioni, questa “determinazione equazionale” permette la predizione, risolvendo il sistema o quanto meno approssimandolo con serie lineari (poi chiamate di Fourier). *No, non si può*: bastano tre soli corpi nei loro campi gravitazionali (il Sole e due pianeti), perché la dinamica determinata dalle equazioni risulti imprevedibile (Poincaré, 1892: assenza di una soluzione integrale, assenza “quasi ovunque” di serie approssimanti – un enorme letteratura, per esempio (Charpentier et al. 2006)).

Diceva Hilbert (1920): formalizza con rigore un enunciato in una teoria che contenga la teoria formale dei numeri (ci riguarda, poiché stiamo parlando di macchine aritmetiche), si potrà sempre dimostrare se è vero o falso. *No, non si può*: data una siffatta teoria, posso sempre costruire un asserto indecidibile (Gödel, 1931).

Dicevano e dicono i biologi molecolari genocentrici (2001 – 2017, nei riferimenti): abbiamo “decodificato le istruzioni” dello sviluppo umano, scritte nel DNA: dammi un fenotipo, normale o patologico ed io ne trovo il gene, la “scrittura alfabetica” che lo determina. Elimineremo così in pochi anni tutte le malattie genetiche, poi il cancro, per il 2015¹; riscrivendo il DNA, controlleremo l’evoluzione²...

Insomma:

descrivo, formalizzo, implemento, calcolo... predico, decido, controllo...

è un mito antico ed è falso, da 2500 anni. Come si vede, si tratta sempre di un mito della completezza di una scrittura alfa-numerica (con qualche logogramma, per scrivere equazioni), da Pitagora alle quattro lettere del DNA³, alle codifiche alfa-numeriche dell’IA (Lassègue, Longo, 2025). Ogni volta, l’a-logos aritmetico⁴, l’imprevedibilità e la non calcolabilità raccontano di costruzioni geometriche o di dinamiche naturali che sfuggono a tale scrittura, essenziale alla programmazione di macchine; a questo

1 F. Collins, direttore del Human Genome Project (1993 - 2008), poi dell’NIH (2009-21), in molti testi; quindi il direttore del NCI: “eliminating suffering and death due to cancer by 2015”, (von Eschenbach 2003).

2 ...“on the power to control Evolution”, v. (Doudna Sternberg 2017) e (Longo 2021).

3 “La surprise, c’est que la spécificité génétique soit écrite, non avec des idéogrammes comme en chinois, mais avec un alphabet comme en français, ou plutôt en morse” (Jacob 1965).

si aggiunge la produzione di novità biologica (Longo 2025) e di novità simbolica, umana e storica. La leggenda racconta che i pitagorici uccisero l'autore della prova dell'a-logos al cuore del logos; oggi, in America Latina, si uccide chi critica gli OGM, mostrando gli effetti collaterali dei pesticidi associati ed evidenzia così i limiti del "ri-programmare" le piante⁵.

I limiti delle proposte di Laplace ed Hilbert e le loro sconfitte sono raccontati da molti; forse, per vederle in parallelo, ed il parallelismo è molto forte, si può andare a (Longo 2018), dove si parla anche della deduzione di Einstein della "incompletezza" della Meccanica Quantistica (deduzione bellissima, ma basata su ipotesi errate), e, più discorsivamente, a (Longo 2023).

Sempre per parlare di "creatività", ricominciamo da lontano, sempre con la matematica, in quanto pratica evolutiva e storica ed immersa in un contesto di senso, ovvero di "azioni" del vivente nel suo mondo. In generale, intravedo due pilastri del pensiero del vivente: l'elaborare emozioni (Finelli 2022) ed il porre domande. Quindi, e solo dopo, il darsi strumenti per rispondere. Il cane che, assopito sul divano, si alza improvvisamente, annusa in varie direzioni, dilatando le narici, si domanda, con emozione, paura, desiderio: cosa è questo odore, da dove viene? Quel cane sta pensando. Continuamente gli animali interrogano l'ecosistema, lo esplorano. In realtà sono sempre attivi, perché il *cervello* è sempre attivo; non è una macchina input-output, ma è in permanente attività, spesso caotica, soprattutto se "a riposo" o in deprivazione sensoriale: è la sua super-attività ad essere canalizzata, "constrained" dal colpo, dal segnale che arriva. Il neo-nato, non "attiva" il cervello, ma l'attività caotica e la crescita disordinata (Edelman 1987), si ordina e co-ordina grazie alla *frizione* del cervello con l'ecosistema, con e tramite il corpo. Questa frizione è un primo "porre domande" al contesto di vita.

Torniamo alla matematica. Tanti, in IA, ci mostrano macchine che sanno dimostrare alcune formule "già date" e questo è rilevante e molto utile. Si dimentica così che quello che più conta nell'invenzione matematica: porre le "buone" domande, capire quali sono i teoremi che "val la pena dimostrare", saperne scrivere l'enunciato con rigore, ponendosi al giusto "livello di generalità". E si dimenticano pratiche comuni, extra-linguistiche, la cui descrizione formale-linguistica, non solo è possibile esclusivamente a posteriori, ma non permette di fondare la prova su metodi formali linguistici, ci tornerò con degli esempi.

In altri testi, ho già fatto riferimento ad una delle domande forse "primarie" degli umani, a quando cioè si sono chiesti, con emozione, timore, il "senso" del cielo, del Sole, della Luna ed hanno inventato miti in riti comuni. Miti che han posto altre domande, come quelle cui hanno dato risposta disegnando sulle pareti di Lascaux od Altamira: bisonti, cavalli, leoni... alcuni dei quali non sono forme, "macchie", ma puri contorni, delle linee. Linee che non esistono, come quelle fra le stelle: gli oggetti non hanno contorni, li costruisce la corteccia visiva primaria nel cervello dei grandi vertebrati (Petitot 2017) – ed alcuni umani li hanno poi proiettati su pareti di roccia. Fino all'audacia della geometria di Euclide che, per rispondere alla domanda "quale è l'area di questa figura piana?", inventa la "linea senza spessore", che non esiste, proponendo così la difficile nozione matematica di "bordo", fondamento di una teoria coerente delle superfici piane, struttura primaria della matematica occidentale (Rudyak 2008). Liu Hui⁶ non l'ha, ma ha numeri negativi e mette un spazio vuoto per lo 0 – pure questi non esistono, se non per i commercianti che si chiedono come annotare il debito – una diversa costruzione di oggetti ed oggettività scientifica, in entrambi i casi ben esplicitate, nel loro contesto storico e teorico, in immense ma ben diverse "summe matematiche" - le opere che portano i nomi di

4 Ben oltre $\sqrt{2}$, Cantor nel 1874 ha dimostrato che "quasi tutte" le sequenze infinite di numeri interi (quasi tutte le lunghezze date come numeri reali) non si possono definire con un numero finito di segni – per un risultato ancora più forte, si veda (Martin-Löf 1966; Calude, Longo 2016).

5 Per renderle viabili gli OGM bisogna usare pesticidi che distruggono l'humus, molti dei quali sono cancerogeni (e vietati in Europa), vedi i riferimenti ed ascolta L. Bombardi in <https://frequenceprotestante.com/events/parcours-scientifiques-3/> - il loro uso è cresciuto del 400%, sul continente americano, in 20 anni (Giraud, Amelier 2024). In compenso, produciamo e vendiamo loro anche chemioterapici (di nuovo, vai a Bombardi, più su).

6 Liu Hui (III secolo, Cina) *Les Neuf Chapitres*, traduit en français per Karine Chemla et Guo Shuchun (2004).

Euclide e di Liu Hui. Non esiste una matematica senza una metafisica, senza *le domande* che portano a ritagliare e qualificare frammenti del mondo, a produrre oggetti concettuali nuovi che diventano *oggetti del desiderio* del matematico che li pensa, li inventa anche oggi, in astratto.

Vediamone un esempio. Quando il maestro della scuola elementare chiese ai bimbi di fare, per punizione, la somma dei primi 20 numeri interi, il piccolo Carl Frederic Gauss si pose la buona domanda matematica: ma... “quale è la somma dei primi n numeri interi”? Geometrizzando l’analisi, li pone su una linea

1 2 ... n

quindi ne inverte l’ordine:

n $(n-1)$... 1

un’audace simmetria per riflessione sul piano.

Questo dà, con facili somme in verticale:

$(n+1)$ $(n+1)$... $(n+1)$

da cui deriva la formula generale: $\sum_{i=1}^n i = n(n+1)/2$.

Qualsiasi macchina sa dimostrare per induzione tale formula, e non sa far altro. Ma questo è “proof checking”, a posteriori, non è “far matematica”, ovvero il *porre* una domanda “interessante” e, poi, provare a rispondere – ovvero, al di là della matematica punitiva, come è vissuta da tanti bimbi a scuola, porre la domanda “propriamente” matematica⁷. In generale, in matematica, la “formula” da dimostrare non è già data – l’arrivare a scrivere esattamente l’enunciato che si vuole, con il giusto livello di generalità, è di per se una parte enorme del lavoro. Talvolta poi, anche quando già si ha “la formula”, come il problema dell’esistenza di soluzioni intere di $x^n+y^n=z^n$ per $n > 2$ (“l’ultimo teorema di Fermat”), per dimostrarlo, il matematico (Wiles) ha fatto un “detour” incredibile, inventando concetti originali in geometria algebrica, teoria delle curve ellittiche e delle “deformazioni di Galois” (nel continuo), ponendosi a riguardo mille domande, per arrivare a dire che l’equazione non ha soluzioni.

Ma vediamo la prova del piccolo Gauss più da vicino. Essa *non è per induzione* aritmetica, ma è una “prova prototipo” (una nozione di Herbrand (1929), Longo 2000) su “ n generico”, ed è data al di fuori del linguaggio della Teoria dei Numeri. E’ cioè uno “schema geometrico o struttura di prova” che vale per ogni n e produce la formula, che a quel punto è dimostrata – volendo la si può, dopo, controllare per induzione, ma è inutile. In IA si dice allora: descrivimi con rigore la prova, la formalizzo ed implemento. Anche quando si può, che senso ha formalizzare *a posteriori* (descrivere nel linguaggio) la prova geometrica del piccolo Gauss? Descritta con tutti i dettagli (rigore?) nel linguaggio, essa è “ad hoc”: non è basata su principi scritturali, logico-deduttivi, ovvero sull’induzione. La dimostrazione del piccolo Gauss, invece, è basata su principi geometrici generalissimi: buon *ordine* dei numeri interi e *simmetrie*, che permettono di costruirla e la *fondano* (dei “principi di costruzione”, Bailly, Longo 2006). Questa differenza è di straordinaria importanza e sfugge al formalista ed in IA dove si ritiene ancora che la scrittura alfabetica, in particolare assiomatica, è “completa” (Lassègue, Longo, 2025). Come si diceva, questa ipotesi era propria a Laplace, 1799 (“completezza predittiva” della scrittura equazionale o della approssimazione in serie di potenze), ed ad Hilbert, 1920 (“completezza deduttiva” dei sistemi assiomatici contenenti la Teoria Formale dei Numeri) - entrambe dimostrate false. Tale ipotesi risorge continuamente. Il massimo del ridicolo, nonché del tragico, direbbe Marx, è il suo ripresentarsi per la terza volta, come “Dogma Centrale” (1958) della biologia molecolare, ancora oggi

⁷ In (Longo 2011), inizio con l’esempio del piccolo Gauss l’analisi matematico-filosofica di alcuni “risultati concreti di incompletezza”. Questi sono enunciati interessanti di Teoria dei Numeri, che si possono scrivere in Teoria Formale dei Numeri, ma la cui dimostrazione esige ordinali transfiniti, non definibili in modo esplicito, predicativo, o “giudizi geometrici” (Teorema di Kruskal-Friedman, KF) oppure “carichi induttivi” tali da sfuggire anche alla analisi con ordinali transfiniti (Teorema di Normalizzazione di Girard), ne parleremo. Dimostrazioni rigorose, che “evocano” strutture (geometriche) “significanti” per il matematico, molto astratte, sono allora dimostrabilmente non “formalizzabili”.

attuale per giustificare OGM e pesticidi (Longo 2023a): l'informazione onto-filo-genetica è completamente scritta nelle quattro lettere del DNA. Oggi, l'ideologia scientifica dietro queste due tecno-scienze, centrata sull'idea della "completezza della scrittura alfa-numerica" rispetto al mondo, è incrollabile: le immense imprese tecno-commerciali che giustifica sono "too big to fail".

Probabilità, a priori, a posteriori

Le probabilità entrano spessissimo nei discorsi e nella pratica dell'IA: ottimizzazioni statistiche e scelte probabiliste strutturano il Deep Learning ed i LLM. Le probabilità sono una misura, *a priori*, delle attese di un risultato imprevedibile. Così, sulla base di simmetrie, posso dare a priori le probabilità del risultato di un lancio di dadi o di una moneta: le simmetrie dei dadi e della moneta danno una misura nello spazio dei risultati possibili. Più in generale, data una teoria fisica (classica, quantistica), una misura, nel senso matematico (ad esempio "di Lebesgues"⁸), data sul suo spazio delle fasi (spazio degli osservabili e parametri pertinenti), propone dei valori di probabilità per eventi in detto spazio – ovvero, le probabilità sono una misura a priori dell'aleatorio, in quanto imprevedibilità, si diceva, relativamente alla teoria intesa e differisce fra ambiti classici e quantistici (Calude, Longo 2016). Le simmetrie dei dadi o di una moneta forniscono una misura "oggettiva" per le probabilità; in casi più generali, il soggetto conoscente, deve *proporre* una misura nello spazio delle fasi della teoria, ovvero come organizzare e dar pesi relativi agli eventi possibili nello spazio dato. Questo è l'inevitabile apporto soggettivo, prospettico, nell'analisi delle probabilità: esso raggiunge il massimo di oggettività quando il fenomeno in esame presenta, ad esempio ed a priori, simmetrie *invarianti* rispetto qualsiasi sistema di riferimento (o "punto di vista"). Lavorando in questa direzione, nel 1933, Kolmogorov ha proposto un approccio assiomatico per la nozione di probabilità. Proprio utilizzando la teoria matematica della misura, egli ha elaborato una specifica entità sintattica, che chiamò spazio di probabilità, basata su un universo di eventi elementari e usata per definire un'algebra di eventi, sulla quale si postula l'esistenza di una misura di probabilità: così la nozione di probabilità ed i suoi spazi di applicazione è divenuta perfettamente e stabilmente definita dal punto di vista formale, in termini di teoria degli insiemi. Questo ha dato origine a un caso paradigmatico del determinare il rilievo, rispetto a uno scopo pragmatico dato, delle relazioni tra sintassi e semantica, cioè di cogliere il senso fisico dell'astrazione matematica (Mugur-Schachter, Longo 2014), che è ancora ben lungi dall'essere risolto.

La dipendenza della scelta della misura di probabilità proposta a priori dal soggetto conoscente (il primo approccio, menzionato) e delle frequenze osservate *nei dati a disposizioni* (quindi *a posteriori*, un secondo approccio), ha portato Kolmogorov stesso, negli anni 1960, a scrivere un altro quadro formale, basato sulla teoria degli algoritmi, inizialmente in termini di incompressibilità per sequenze finite, ma poi meglio specificato per sequenze infinite (che "passano tutti i test statistici" (Calude 2002)). Infatti, grazie a (Martin-Löf 1966), si è potuto dare una nozione stabile, puramente matematica ed indipendente dalla teoria e dai dati, di "aleatorio algoritmico", di grande eleganza, ma che si applica, ancora una volta, solo in modo asintotico (su sequenze infinite). L'aleatorio asintotico, derivato dalla teoria della calcolabilità, permette di fare ponti fra le diverse forme di aleatorio in fisica (Calude, Longo 2016). Infatti "aleatorio", che differisce in teorie fisiche diverse, fino a presentare sfide proprie in biologia, dove fenomeni classici e quantistici si sovrappongono nella cellula (Buiatti, Longo 2013; Bravi, Longo 2015), e dove il cambiamento dello stesso spazio delle fasi (dei possibili evolutivi) modifica radicalmente la natura della imprevedibilità biologica (Longo 2017; Montévil 2022).

Seguendo un ben diverso approccio e guardando al passato, ai "dati", per controllare il futuro, si possono prendere in considerazioni, *a posteriori*, le frequenze con cui sono dati dei valori in uno spazio già fissato di possibilità. Queste possono esser chiamate delle "probabilità", ma non coincidono, se non al limite infinito, in modo cioè asintotico, con le probabilità definite più sopra. Ad esempio, nessuna sequenza finita, già data, di lanci di una moneta o di un dado garantisce che i risultati siano distribuiti

8 https://en.wikipedia.org/wiki/Lebesgue_measure, consultato il 3/5/26.

“simmetricamente”: metà testa, metà croce, per la moneta; un sesto di 1, un sesto di 2... per il dado. Matematicamente, è invece lecito supporre che, in una sequenza infinita di lanci, la simmetria delle probabilità a priori sia rispettata dalla distribuzione dei risultati, ovvero dalle frequenze con cui appaiono i diversi risultati possibili. Ma è difficile parlare in questo caso di un “a posteriori” (all’infinito?). Tuttavia, seguendo Bernoulli e von Mises (i riferimenti in IA), si possono usare queste frequenze relative per proporre il valore numerico della probabilità dell’evento in esame, in un senso ideale non-effettivo, se non altro perché verificabile solo in modo asintotico.

In breve, l’analisi *frequentista* fa riferimento al numero (alla “percentuale”) degli eventi già dati, tipicamente in un Data Base, e può essere utilizzata per aggiornare le probabilità soggettive, adeguandole al contesto (attraverso il teorema di Bayes sulle probabilità condizionate⁹). Tuttavia:

- La probabilità non è riducibile alla frequenza: la probabilità è una valutazione (una misura) data a priori (prima dell’osservazione), mentre la frequenza è un dato a posteriori (dopo l’osservazione).
- La frequenza non definisce di per sé la probabilità, come misura (di Lebesgues, ad esempio) data a priori, anche se in molti casi le distribuzioni delle frequenze già date possono approssimare le probabilità, fino a coincidere asintoticamente, cioè per sequenze infinite (e.g. in giochi d’azzardo simmetrici), ma non è sempre così. Ad esempio, la probabilità che un certo cavallo vinca una corsa è soggettiva e dipende dalle informazioni disponibili, non solo dalle frequenze passate. In assenza di sufficienti simmetrie (fra i cavalli?), che senso ha di passare a sequenze infinite di risultati di corse di cavalli?

In IA, sono proprio le frequenze di associazioni fra parole o nodi di una rete presenti nelle basi di dati che vengono usate per estendere frasi (LLM: *mangiare* è seguito da... *carne, salmone, bacche...* con frequenze diverse ma tutte più grandi di... *scarpe*), oppure aggiungere links fra nodi (DeepLearning). Così grandi basi di dati guidano la macchina nelle estensioni o completamento di frasi od immagini da fare, grazie a *distribuzioni di probabilità* (come frequenze) di sequenze già date, nel discreto. A questo scopo, viene spesso usata la funzione *Softmax*. Questa converte un vettore di numeri (frequenze) in una distribuzione di probabilità, normalizzando il risultato (vedi il denominatore), in modo che la somma sia sempre uguale ad 1:

$$\sigma(\mathbf{z})_i = \frac{e^{z_i}}{\sum_{j=1}^K e^{z_j}} \quad \text{for } i = 1, \dots, K$$

Ovvero, comunque sia la distribuzione delle frequenze *date*, la somma su i dei σ (le frequenze relative) sarà sempre 1, senza bisogno di aspettare l’infinito. Si trasforma così un a posteriori (i dati disponibili) in un a priori: delle probabilità che guidano la costruzione di nuove sequenze. E qui si può fare un gioco astuto: inserire dei coefficienti β negli esponenti più su

$$\sigma(z_i) = \frac{e^{\beta z_i}}{\sum_{j=1}^K e^{\beta z_j}} \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, K$$

Facendo variare β , il cui inverso è chiamato “temperatura”¹⁰ (quando cresce aumenta il disordine, un’evocazione dell’“entropia” fisica), si modificano le probabilità derivate dalle frequenze ed eventi

⁹ https://en.wikipedia.org/wiki/Bayes%27_theorem, consultato il 3/6/26.

¹⁰ Equazioni riprese da M. Vitali-Rosait, La créativité des LLM, *Blog Cukture numérique*, Lyon, url: <https://blog.sens-public.org/marcellovitalirosati/creativitellm.html> consulté le 10/5/26.

rari del passato possono essere resi molto probabili nel futuro (e viceversa) – il valore di β può esser dato e cambiato da un umano, a mano, essere associato alla fluttuazione termica locale od allivello di umidità a Katmandu. Ed un LLM ad “alta temperatura” o temperatura cangiante può sembrare molto “creativo”: introducendo o variando il “disordine”, ad hoc, secondo i valori di β , associa parole in modo “entropico”. Questo viene gabbellato per “originale”, “creativo”... Ma di che stiamo parlando? Ecco una differenza fra il far scienza ed una tecnoscienza molto finanziata e da piazzare sul mercato.

Creatività simbolica e scritturale

E' possibile fare ora un simpatico gioco di parole alla ricerca di creatività computazionale. La nozione di “creatività” è già presente in teoria degli algoritmi. Un “insieme creativo” (Rogers 1967) è un insieme infinito A generabile da un algoritmo (ricorsivamente enumerabile, r.e.) il cui complemento CA è “produttivo” – per il quale esiste cioè una funzione calcolabile f tale che, per ogni indice i di un insieme r.e. W_i contenuto in CA , $f(i)$ è definita e produce un elemento appartenente a $CA \setminus W_i$, il complemento di W_i in CA . Queste definizioni in teoria della calcolabilità (creativo, produttivo) sono ispirate dalla *dimostrazione* di Gödel: l’insieme (dei “numeri-codici di Gödel”) dei teoremi della teoria formale dei numeri è “creativo” ed in loro complemento è un insieme “produttivo”¹¹. Più precisamente, la prova del teorema permette di definire una funzione come la f più sopra. Si noti che, in generale, il senso di un teorema è soprattutto nella sua prova e, molti, troppi, invocano solo l’enunciato di Gödel. Ora, la prova si basa sulla costruzione di un metodo *uniforme ed effettivo*, una funzione calcolabile f , che, data ogni teoria formale che estenda l’aritmetica, produce un asserto indecidibile anche per la nuova teoria¹². Quindi, la teoria formale dei numeri, l’aritmetica, non solo è incompleta, ma è *incompletabile* (!): nessuna sua estensione formale è completa – e posso costruire l’asserto indecidibile (di indice) $f(i)$ più sopra. A fortiori, se si ha un linguaggio di programmazione, che, necessariamente, lavorando su macchine numeriche, è ben formalizzato e contiene la teoria dei numeri (l’induzione, tipicamente) – ad esempio il linguaggio che avrebbe formalizzato la più audace delle nozioni di creatività del più fantasioso degli artisti o scienziati (generato quindi un W_i), il metodo di Gödel permette di calcolare l’indice $f(i)$ di una formula che sfugge alla estensione W_i . Insomma, se tu riesci a formalizzare in un linguaggio (di programmazione) che descriva una nozione di “creatività”, anche se la tua formalizzazione si aggiunge alla aritmetica ($A + W_i$), io ti produco un nuovo asserto, di codice $f(i)$, che gli sfugge¹³.

La situazione è in realtà ancora più complessa e profonda di questo finissimo calembour diagonale di Gödel. Come si diceva, Wiles ha dovuto inventare concetti e strutture matematiche originali (geometriche, algebriche, differenziali...) per dimostrare un semplicissimo asserto numerico (Fermat).

11 Gödel inventa l’idea che ad ogni formula ben formata di una teoria formale, ad ogni funzione calcolabile, ad ogni insieme r.e. si può associare un numero, un codice – idea al cuore del mondo numerico.

12 Sia A l’insieme dei (codici dei) teoremi della teoria formale dei numeri. Una estensione propria definisce un insieme non vuoto r.e. W_i in CA (aggiunge una lista effettiva di (codici di) teoremi generati a partire da assiomi aggiuntivi). La prova di Gödel definisce una funzione f che calcola (il codice) $f(i)$ di un asserto che non è né in A né in W_i (ovvero, $f(i)$ è in $CA \setminus W_i$). Gödel demolisce dall’interno il programma formalista, precursore dell’IA classica: data una qualsiasi teoria che contenga l’aritmetica, in modo formale, calcolabile, costruisce un programma, quello per f , per produrre un asserto indecidibile per tale teoria. Più oltre accennerò a risultati recenti che obbligano ad uscire dal formalismo computazionale, e lo dimostrano.

13 Per pigrizia, ho chiesto a CPT-5 di ricordarmi la definizione di insieme “creativo” in teoria della ricorsività. La risposta conteneva un piccolo, sottile, ma catastrofico errore (a domanda, la macchina l’ha corretto: “this is a good point...” - bastava accorgersene). Sono andato a prendere (Rogers, 1967) fra i miei scaffali per controllare – libro per me importantissimo: dopo l’esame di Istituzioni di Geometria Superiore, Enrico Bombieri (Fields Medal, 1974) mi chiese cosa mi interessasse in particolare in matematica e mi consigliò il Rogers, splendida summa del sapere dell’epoca in materia, ricco inoltre di esercizi originalissimi - se un intelligente artificiale cercasse di risolverne almeno un decimo, smetterebbe di dire sciocchezze sulle macchine - (Odifreddi 1999) è un bel ed ormai classico arricchimento di quel testo.

Non sappiamo però se questi “detour” sono *necessari*: è possibile che esista una prova formale del teorema – il problema è aperto; di certo, se la negazione del teorema fosse stata vera, sarebbe stata dimostrabile in aritmetica¹⁴. Possiamo invece dare “teoremi di incompletezza concreta” più recenti, ovvero asserti formalmente indimostrabili ed “interessanti”, non finissime astuzie diagonali alla Gödel (e lo stesso dicasi per i risultati di incalcolabilità di Church, 1932, Turing, 1935). Ovvero, asserti di cui *si dimostra* che sono indimostrabili in aritmetica, e di cui si può dare una prova, ma questa *esige* un lungo detour. Fra questi, il teorema di Kruskal-Friedman (KF), (Harrington 1985), ed il teorema di normalizzazione in (Girard et al. 1990) - per una discussione di entrambi (Longo 2011)¹⁵.

Questi risultati vanno ben oltre la gerarchia dei W_i , così produttiva in teoria dei numeri, e ci permettono di affinare (e rovesciare) la domanda ai tecnici dell’IA: se mi dici che *stile* di programmazione usi (questione di proprietà logiche delle scritture alfa-numeriche), allora ti do’ un enunciato di teoria di numeri la cui derivazione gli sfugge: al più, se possibile, bisognerà darsi un linguaggio (ed una logica) che vada oltre quello “stile” per dimostrarlo, e questo ogni volta ad hoc, con molta inventività di programmatori umani. Ed il gioco può continuare....

Vediamolo più da vicino. Quasi tutti i linguaggi di programmazione hanno strutture logiche “predicative” (predicativo: nessun “tipo” dei programmi è definito da una quantificazione sulla classe di tutti i tipi), in particolare i linguaggi usati in IA: Python, C++, Prolog, Haskell... Il Teorema KF si può enunciare in teoria dei numeri (quella classica, predicativa), ma la sua prova esige un detour con la costruzione di un ordinale *impredicativo*, la cui definizione dipende da una quantificazione sulla classe di tutti gli ordinali (per la dimostrazione impredicativa e per l’indimostrabilità predicativa di KF, una prova difficilissima dovuta a H. Friedman, si veda (Harrington 1985)), oppure esige un “giudizio geometrico”, nello stile del piccolo Gauss più in alto, geometricamente semplice, ma logicamente molto complesso (Longo 2011). La semplice scrittura della prova di KF, per la sua struttura impredicativa, sfugge quindi alla maggioranza dei linguaggi di programmazione usati in IA, tutti predicativi. Tuttavia, esistono linguaggi o stili di programmazione che ammettono definizioni impredicative, come *Cog*¹⁶ o *Quest* (Cardelli, Wegner 1985). Alcune caratteristiche di *Quest* e della sua semantica matematica (Cardelli, Longo 1991) hanno influito sulla progettazione di Java e di alcuni linguaggi di programmazione orientati agli oggetti (League et al. 1999)¹⁷. Allora possiamo descrivere la prova di KF! Certo, anche se non è banale: il primo ordinale impredicativo Γ è un oggetto molto complesso, ci vuole molta creatività logico-programmatoria. Ma noi possiamo continuare il gioco: l’aritmetica del II ordine, formalizzata alla Girard (Sistema *F*, Girard et al. 1990) permette di trattare prove in contesti “impredicativi” e *Quest* ne implementa la struttura logica; tuttavia, la prova di normalizzazione del Sistema *F* (che è niente di meno che una prova di coerenza della Analisi, quella del calcolo differenziale, per dire), non può essere data in... *F* (e tantomeno in *Quest*). E via dicendo. In conclusione, qualsiasi sistema o linguaggio formale o di programmazione od anche stile proposti, abbiamo strumenti per scrivere asserti che non sa dedurre, calcolare, persino scrivere, talvolta partendo da semplici gesti sul foglio, ordine e simmetrie, come il piccolo Gauss. Ma dando questa volta, ovvero nei casi appena citati, *prove* della loro non deducibilità o non programmabilità formale nello “stile” dato.

Questo ci permette di tornare su un punto cruciale. Il progetto di Frege (1884) ed Hilbert (1900), pur con prospettive diverse, era di “fondare” la matematica *a posteriori*, rispettivamente su logica e linguaggio, assiomatico deduttivo, formale (Hilbert: “formale” = “potenzialmente meccanizzabile”

14 La negazione del teorema di Fermat è un asserto del tipo “esiste un $n...$ ”, quindi, se fosse stata vera, si sarebbe potuto trovare tale n , anche a macchina, scandendo uno dopo l’altro tutti i numeri n . Scommetto che c’è una macchina che ci prova ancora...

15 Il teorema di normalizzazione non è dimostrabile neppure “a posteriori” per induzione (transfinita), ma solo sulla base di un giudizio di “genericità” dei tipi del Sistema *F* (Girard et al. 1990), tipi che sono in effetti “generici” (Longo et al., 1991).

16 <https://en.wikipedia.org/wiki/Rocq>

17 Forse per questo, il mio lavoro sul tema è stato di gran lunga il più redditizio della mia vita.

(!!)). L'ipotesi debole, in IA, è che, forse, la macchina non sarà “creativa”, ma che, “a posteriori”, può formalizzare, quindi implementare e codificare in sequenze di 0 ed 1, qualsiasi prova o costruzione creativa, in matematica ed altrove. Che senso ha scrivere con cura, fino a codificare con sequenze di 0 ed 1, i “*gesti nello spazio*” (principi di ordine e simmetrie), che *producono* e *fondano* le tre prove menzionate (del “piccolo Gauss” e, con strumenti più forti ma analoghi, KF e Normalizzazione del *Sistema F*¹⁸)? Si perde quel che conta: la scientificità della costruzione matematica. Questa, riprendendo quanto detto all'inizio, è proprio nell'esplicitare i principi che si usano per produrre l'argomentazione scientifica e che rendono convincente anche la prova matematica, permettono di rifletterci, capendo il ruolo di detti principi, anche semplici come l'ordine e le simmetrie. Questa è la costruzione di un sapere critico, scientifico, che produce senso ed oggettività – il resto sono sequenze insensate di 0 ed 1 che il matematico trova impenetrabili ed incapaci di produrre la relativa, umana, certezza¹⁹.

Creatività e storicità

Abbiamo quindi fatto vedere che, da una parte, fissate delle scritture alfa-numeriche, anche quando si sia definita con rigore una lunghezza, un sistema di equazioni, l'asserto di una teoria formale..., posso essere nell'impossibilità di misurare la lunghezza, risolvere il sistema di equazioni, decidere gli asserti della teoria ecc, ecc. Dall'altra, torniamo a chiederci: che vuol dire “definire con rigore”?

L'analisi della non definibilità formale di un oggetto storico è parte integrante di tutto un progetto in biologia in cui lavoriamo in molti. In fisica, un oggetto può esser definito dalle sue proprietà e dalle sue relazioni – fino alla forme più astratte: “un elettrone è una soluzione dell'equazione di Dirac” - specificando il contesto teorico: meccanica delle particelle (stati ondulatori) o di teoria quantistica dei campi (quanti del campo). In biologia, un oggetto (un organismo) è solo definibile sulla base della sua *storia* (Montévil 1922): nessuna lista delle sue proprietà e relazioni caratterizza un topo, ma solo la sua filogenesi, anzi il suo “taxon” (unità sistematica usata per classificare organismi che condividono una comune origine evolutiva). Un topo cui si fa spuntare un orecchio sul dorso con abilità mutagenica, è sempre un topo, perché figlio di topi. Per non dire di una mosca drosophila, che, dopo 120 anni di esperienze di laboratorio, inserendo alcool o pressioni ad un momento preciso dell'embriogenesi, può essere resa mostruosa a piacere (Stewart 2004) – ma rimane sempre una mosca drosophila, stessa specie, taxon... sebbene, con il tempo, lo “hopeful monster” possa contribuire alla speciazione e... dare inizio ad un'altra storia. Anche il medico chiede in primis la storia (clinica) del paziente; il ricercatore di laboratorio etichetta con l'origine storica ogni organismo che studia (topi discendenti da una coppia di un laboratorio polacco di 20 anni fa – persino le cellule in cultura sono etichettate storicamente). E, di nuovo, la scienza, la tecnoscienza... ed i loro concetti, sono costrutti storici, con le peculiarità di “costruzione di conoscenza oggettiva” o meno, cui si è accennato all'inizio: l'analisi di un risultato di una storia non si può porre fuori dal mondo, ma se ne esplicitano, per quanto si può, i percorsi costitutivi, la specificità storica – così come non si può dare una “definizione formale” di topo. Per questo la richiesta di certuni in IA non solo è falsificata dalla storia (descrivi con rigore: formalizzo, calcolo..., da Pitagora in poi – non funziona), ma va rovesciata: non sta a noi “definire formalmente la creatività (scientifica, artistica, storica...)”, al più possiamo raccontarne diverse specificazioni storiche (come la creatività naturalistica di Leonardo e Cardano, messa da parte e dimenticata per secoli dall'inventività meccanicista della rivoluzione scientifica (Longo, Longo 2021)), ma sta all'intelligente artificiale dire in che linguaggio formale e di programmazione intende lavorare... o di che tipo intende crearne; la storia ci dice che si va sempre oltre, come si è visto più su.

18 La “genericità” dei tipi in *F* (Longo et al. 1993) è una proprietà di simmetria.

19 O scimmiesca... come spiega (Teissier, 2005): capisco un teorema quando, certo, ne seguo la “logica”, ma poi riesco a spiegarlo anche al “mio cervello di scimmia” – traiettorie, bordi, tracce, ordine, continuità-discontinuità....

Per riassumere, se si fa il gioco: tu dai un sistema (scritturale) alfa-numerico, da Pitagora a Laplace a Hilbert a Monod²⁰... qualcuno inventa un asserto che gli sfugge – e vince la creatività non algoritmica (o l’epigenetica in biologia²¹). Se, invece, prima un umano fa un gesto creativo, ad esempio Euclide che propone la “linea senza spessore”, tu, puoi, in certi casi ed a posteriori, formalizzare la geometria di Euclide. Ma poi Ambrogio Lorenzetti inventa una rappresentazione geometrica che evoca la presenza dell’infinito in atto di Dio nelle Annunciazioni (v. sopra) o Riemann spazi a curvatura variabile e vanno oltre Euclide. Se formalizzi allora la geometria proiettiva, Newton inventa il calcolo differenziale, e dopo Riemann, Grothendieck inventa i Topos. Il fatto è che far matematica è il continuo inventare nuovi concetti e strutture, dai con di Apollonio, che unificano in tre dimensioni le curve piane, alla geometria algebrica attuale, che correla algebra, geometria, analisi... fino alle piccole invenzioni che danno il “senso” di far matematica, ogni giorno, come quella di Gauss bambino. La produzione di novità evolutiva e simbolica, storica, “la creatività”, è proprio questo: il prodursi od il proporre qualcosa che non esisteva e non poteva neppure essere “pre-detto” (detto prima), che non esisteva neppure come “possibile” per forma, funzione, senso...²². E comunque, la codifica linguistica, anche quando arriva a posteriori, fa spesso perdere, si diceva, la scientificità della costruzione: ne oscura i principi. Ma forse, rimbambiti dagli schermi che alternano pubblicità e testi prodotti da funzioni *softmax*, smetteremo di inventare – a meno di non sottrarre queste formidabili tecnologie a miti alimentati da oligopoli il cui scopo è il merchandising ed il controllo dell’umano²³.

Guardare i fenomeni o smontare le macchine?

E' piuttosto stupefacente osservare la moda che spinge ad analizzare l'IA in termini "fenomenali", ovvero descrivere i suoi output, trascurando i "meccanismi" che li producono. Questo è in particolar modo vero se si compara alla moda inversa in biologia: si pretende di andare sempre dal fenotipo al “meccanismo” molecolare, saltando lo sguardo ecosistemico e storico sull’organismo come “unità biologica” in cui tutti i livelli di organizzazione sono “causalmente rilevanti”. Tipicamente, la macchina la si può sempre decomporre in componenti elementari e semplici, mentre questo non è possibile per un organismo: esso è composto da parti “elementari”, le cellule, indecomponibili se non morte, che *non sono* semplici. Inoltre, le stesse reti di interazione macromolecolari in una cellula, eucariota poniamo, che sono certo descrivibili in termini chimico-fisici, non sono *derivabili* dalla chimica fisica (od hanno probabilità 0 in essa): ad esempio, solo l’evoluzione biologica, una storia, può giustificare/far capire la “assurdità” chimica dalla proteasi in un eucariota²⁴.

Di conseguenza, mettendo in evidenza solo i fenomeni in IA, si nascondono i principi di funzionamento meccanico fra i quali due fondamentali: la struttura causale e l’iterazione identica. In breve, l’analisi della causalità in fisica è fondata su “principi di conservazione” e questi sono *simmetrie continue* (Teoremi di Noether (Kosman-Schwarback 2010)). Nel discreto, ovvero in strutture fatte di punti isolati, la causalità fisica classica-relativista salta e... o si ha dell’aleatorio (intrinseco, come in fisica quantistica) o una struttura imperativa (in ambiti classici): i pixel (classici) sullo schermo, per cambiare, seguono gli *ordini* del sistema operativo, sempre scritto in un linguaggio imperativo²⁵. Lo stesso dicasi in biologia: i geni, visti come istruzioni, danno *ordini* per lo sviluppo dell’organismo. Il

20 (Monod 1970) è di gran lunga il quadro più rigoroso per il Dogma Centrale della biologia molecolare: la completezza della scrittura dell’ontogenesi nel DNA, scartando a priori il ruolo di tutti gli altri livelli di organizzazione - tessuto, organismo, ecosistema... nello sviluppo e nell’evoluzione del vivente (“l’evoluzione è dovuta a rumore”, errori di riscrittura, scrive Monod).

21 Si veda (Fox-Keller 2000, West-Heberhard 2003).

22 Alcuni di noi insistono da tempo sulla impossibilità, in biologia, di uno spazio pre-dato delle fasi, nel senso della fisica (Kauffman 2000; Bailly, Longo 2006).

23 <https://cahiersdu.net/numero/techno-fascisme/article/techno-quoi/>, in italiano: <https://zenodo.org/records/21108236>

24 La situazione è analoga a quella degli enunciati ricordati più su, KF e Normalizzazione, enunciabili in teoria dei numeri, ma non derivabili da detta teoria.

continuo ed il discreto matematico propongono diverse letture della natura, la seconda inevitabilmente imperativa (Longo 2026). Ovvero, le due tecnoscienze di cui stiamo parlando, descrivono in termini di *pitagorismo imperativo*, codifiche alfa-numeriche ed ordini, sia la cognizione sia il vivente: seguono “executive orders”. Infine, sull’iterazione: la più caotica delle dinamiche non-lineari, il più selvaggio degli uragani, una volta implementati in una macchina a stati discreti (un computer) *iterano in modo identico*, se solo si tocca il tasto “restart” – la macchina ri-parte esattamente sugli stessi bits e pixels. Questo è assurdo dal punto di vista delle dinamiche fisiche, naturali. Ancor più per la biologia: una delle proprietà del vivente è di essere una “iterazione *mai identica* di un processo morfogenetico”, anzi una “eterogenesi” (Sarti et al. 2022). L’IA come tecnoscienza nasconde questi principi costitutivi della sua immagine del mondo, anche se gli esperti aggiungono un β , che vien fatto cambiare, nella funzione *softmax*, e questo evita che il testo od il processo venga sempre ri-prodotto identicamente²⁶. La biologia molecolare imperativa giustifica la sua prospettiva con dogmi notoriamente falsi, riconoscendo, come si diceva più su, che “è più complicato”.

Re-inventare le attività umane in rete

Le reti che stanno cambiando il mondo sono nate come “commons” (bene comune)... su finanziamento militare. La DARPA, agenzia militare USA, per rendere flessibile la comunicazione militare (scelta contingente dei percorsi per i segnali, in modo da evitare interruzioni in caso di attacco nemico), finanzio’ la costruzione, nel corso degli anni 1970, della prima rete di posta elettronica *digitale*, lasciando alle università il compito di sperimentarla e perfezionarla. Nel 1981, nell’ufficio di Albert Meyer all’MIT, dove ero in post-doc, assistetti ad un pionieristico scambio di messaggi con Stanford. Per 10 anni, negli USA ed in Europa, gli ambienti scientifici ebbero uno straordinario strumento di connessione istantanea, di scambio di idee, di costruzione di progetti comuni. Una rete puo’ aumentare la complessità e la diversità di un sistema, consentendo la formazione di “enclaves” nuove e diverse fra loro, ad esempio la messa in relazione di ricercatori in siti lontani e che, insieme, inventano progetti originali, diversi da quelli di un altro “gruppo in rete”. Sulla base del loro uso e sviluppo come “commons”, i protocolli HTTP e il World Wide Web sono stati inventati al CERN (Ginevra) nel 1989–1990, per fare accedere liberamente i colleghi fisici nel mondo alle loro enormi basi di dati.

Poi la svolta: a partire dagli anni 1990, enormi oligopoli hanno rovesciato l’uso della rete, rendendola sempre più uno strumento di omologazione e controllo, ri-orientandola, con l’IA in particolare, verso la loro origine militare, di gran lunga la più redditizia. Tali strumenti non permettono di vincere le guerre, richiedono quindi sempre nuovi investimenti: un pozzo senza fondo²⁷. E la guerra è il tempo ed il luogo della differenziazione netta fra scienza e tecnoscienza: la prima tace, la seconda si sviluppa al massimo – basta guardare quel che accade durante la I e II guerra mondiale²⁸.

Bisogna ricostruire un nuovo “commun”, un bene comune (Alombert, Giraud 2024): il problema è soprattutto politico – enormi oligopoli si oppongono a questo. Tale costruzione è l’impegno di due

25 Il dibattito Einstein-Bohr ed il lavoro di Turing, entrambi negli anni 1930, chiariscono questo punto. La letteratura a riguardo è enorme: per la questione specifica del rapporto fra “principi di conservazione come simmetrie continue” e la “Discrete State Machine” di Turing, mi permetto di rinviare a (Longo 2026).

26 Ovviamente c’è molto aleatorio in rete, ma gli ottimi matematici che le hanno impostate riescono a farne un “do not care” usando la natura imperativa ed esatta, a stati discreti, di ogni nodo (Longo et al. 2010). L’assenza di esplicitazione teorica, sia della struttura imperativa sia dell’eventuale aleatorio di rete od aggiunto, rendono senza interesse eventuali “evidenze empiriche”, analisi meramente fenomenali che pretendono individuare vaghe analogie di forme in dinamiche cerebrali e in basi di dati in LLM.

27 “Toutes les guerres ont eu leurs « armes miracles »: pourquoi les robots ne gagnent pas la guerre” (consulté le 6 juin ‘26): <https://legrandcontinent.eu/fr/2026/06/03/ia-guerre-josephson/>

28 Si potrebbe obiettare che Einstein ed H. Weyl scrivono lavori fondamentali durante la I guerra mondiale: oppositori attivi all’ingresso della Germania in guerra, si rifugiarono in Svizzera (ETH, Zurigo) al suo scoppio.

progetti UNESCO, sulla “scienza aperta”²⁹ e sul “Software Heritage”³⁰. Numerose iniziative vanno in direzioni parallele, cercando di ri-orientare in modo creativo l’interfaccia umano-macchina³¹. Esistono poi dei dispositivi di partecipazione cittadina basati su una nuova generazione di strumenti digitali che impiegano sistemi di IA, in particolare LLM: sono intesi aiutare i cittadini moderare i loro scambi, a riformulare e chiarire le proprie opinioni e sintetizzarli rapidamente (v. nota precedente). Sorge tuttavia il problema di quali “ipotesi implicite” questi dispositivi portano con sé, quali scelte infrastrutturali e di progettazione rendono possibile l’analisi critica di queste premesse e quali modelli di partecipazione, rappresentanza e deliberazione vi sono incorporati. Le tecnologie, in quanto artefatti sociotecnici, configurano in modo non neutro la visibilità delle voci, la gerarchia dei contributi e le modalità di produzione del consenso (Vitali-Rosati 2024). Queste nuove strutture partecipative richiedono quindi una lettura situata delle premesse e dei punti ciechi di tali dispositivi, all’intersezione tra innovazione democratica, design sociotecnico e governance dei “beni comuni”, costruendo una nuova intelligenza collettiva³². L’uso dell’IA in ambiti particolari, come la ricerca in matematica, può permettere delle frontiere nuovissime e basarsi su metodi di interazione potentissimi, fra l’invenzione umana di concetti e strutture e l’esplorazione e l’uso automatizzato delle correlazioni e delle deduzioni: se invece di banalizzare tutta la matematica a risposte da dare a questioni “combinatorie”, già ben formalizzate, la si apre a nuove interfacce, si possono ottenere (e già si ottengono) risultati molto interessanti³³. Così fioriscono mille iniziative specifiche o “locali e modeste”, la cui somma sta diventando significativa³⁴, da storiche ed ormai consolidate, come Wikipedia, a piattaforme di “partecipazione numerica”³⁵. La capacità collettiva di ri-inventare il web e le tecniche di IA che lo parassitano è tutta basata su capacità politico-economiche di aggregazione e di invenzione critica di nuove pratiche democratiche, strettamente correlate al far scienza invece di tecnoscienza.

29 <https://www.unesco-floods.eu/wp-content/uploads/2022/04/379949eng.pdf>

30 https://www.softwareheritage.org/2025/11/25/software_heritage_2026_symposium_summit/ v. anche: <https://frequenceprotestante.com/events/logiciel-libre-et-le-software-heritage-de-lunesco/>

31 <https://revue30.org/blog/article/peut-on-hacker-les-llm/> et <https://www.monde-diplomatique.fr/2024/11/CHAIX/67724>

32 <https://cahiersdu.net/numero/techno-fascisme/article/quels-automates-numeriques-pour-quelle-forme-dintelligence-collective/>

33 Leiden declaration on AI in Mathematics: <https://leidendeclaration.ai/>

34 https://www.lemonde.fr/idees/article/2026/02/14/il-ne-s-agit-pas-de-renoncer-a-l-ia-mais-de-choisir-une-ia-partagee-libree-des-monopoles-et-recentree-sur-des-echelles-locales-et-modestes_6666758_3232.html

35 <https://www.participation-et-democratie.fr/axe-6>

Riferimenti

- Alombert A., Giraud G. (2024) *Le capital que je ne suis pas*. Fayard.
- Arasse, D. (1999) *L'Annonciation Italienne. Une Histoire de Perspective*. Paris: Hazan.
- Bailly, F., Longo, G. (2006). *Mathématiques et sciences de la nature. La singularité physique du vivant*. Hermann, Paris (in English, Imperial Coll. Press, 2011).
- Bravi, B and Longo, G. (2015) The Unconventionality of Nature: Biology, from Noise to Functional Randomness. *Unconventional Computation and Natural Computation*, Springer LNCS 9252, Calude, Dinneen (Eds.), pp 3-34.
- Buiatti M., Longo G. (2013) Randomness and Multi-level Interactions in Biology. In *Theory in Biosciences*, vol. 132, n. 3:139-158.
- Calude C. (2002) *Information and randomness*. Springer-Verlag, Berlin.
- Calude, C. S., & Longo, G. (2016). Classical, quantum and biological randomness as relative unpredictability. *Natural Computing*, 15(2), 263-278.
- Calude, C. and Longo, G. (2017). The deluge of Spurious Correlations in Big Data. In *Foundations of Science* Vol. 22, Issue 3, pp 595–612.
- Cardelli L., Longo G. (1991) A semantic basis for Quest, *Journal of Functional Programming*, vol.1, n.2, pp.417-458
- Cardelli L., Wegner P. (1985) On understanding types, data abstraction and polymorphism, *Computing Surveys*, Vol 17 n. 4, pp 471-522, December..
- Charpentier, E., Ghys, E., Lesne, A., & Laguës, M. (2006). *L'héritage scientifique de Poincaré*, Belin.
- Doudna J., Sternberg S. (2017) *A crack in Creation, the new power to control Evolution*, Bodley Head, London.
- Edelman, G. M. (1987). *Neural Darwinism: The Theory of Neuronal Group Selection* (Basic Book).
- von Eschenbach A. C. (2003). NCI sets goal of eliminating suffering and death due to cancer by 2015. *Journal of the National Medical Association*, 95(7), 637-639
- Finelli R. (2022) *Filosofia e tecnologia. Una via di uscita dalla mente digitale*, Rosenberg & Sellier.
- Fox Keller, E. (2000). *The Century of the Gene*. Harvard University Press.
- Girard, J.-Y., Taylor, P., & Lafont, Y. (1990). *Proofs and types* (Cambridge U. Press).
- Giraud T., Amelier M. (2024) *L'attention au vivant*, L'observatoire Eds, Paris.
- Harrington, L.A., Morley, M.D., Šcedrov, A., Simpson, S.G. (eds) (1985) *Harvey Friedman's research on the foundations of mathematics*. Elsevier.
- Kauffman S. (2000), *Investigations*, Oxford, U. P.
- Jacob, F. (1965). *Génétique cellulaire: Leçon inaugurale prononcée le 7 mai 1965*, Collège de France.

- Kosman-Schwarback, Y. (2010). *The Noether theorems : Invariance and conservation laws in the twentieth century*, Springer.
- Lassègue J., Longo G. (2025) *L'empire du numérique. De l'alphabet à l'IA*, PUF, Paris
- League C., Shao Z., Trifonov V. (1999) Representing Java classes in a typed intermediate language. ACM SIGPLAN Notices, Volume 34, Issue 9, pp 183–196.
- Liu Hui (III siècle) *Les Neuf Chapitres*, traduit en français per Karine Chemla et Guo Shuchun (2004)
- Longo G. (2018) Interfaces of Incompleteness. In Minati, G, Abram, M & Pessa, E (Eds.), *Systemics of Incompleteness*, Springer, New York, NY.
- Longo G. (2000). [Prototype Proofs in Type Theory](#), *Mathematical Logic Quaterly*, vol. 46, n. 3 (formely: Zeitschrift f. Math. Logik u. Grundlagen der Math.).
- Longo, G. (2011). Reflections on Concrete Incompleteness. *Philosophia Mathematica*, 19(3), 255-280.
- Longo, G. (2017). How Future Depends on Past Histories and Rare Events in Systems of Life, *Foundations of Science*, pp. 1-32
- Longo, G. (2021a) Programming Evolution: a Crack in Science. A Review of the book by Jennifer A. Doudna and Samuel H. Sternberg "A Crack in Creation: Gene Editing and the Unthinkable Power to Control Evolution", *Organisms. Journal of Biological Sciences*, 5(1), 5-16.
- Longo G. (2023), *Le cauchemar de Prométhée. Les sciences et leurs limites*, Paris, PUF.
- Longo G. (2023a) Les nouveaux Organismes génétiquement modifiés (OGM) : pour un « principe de précaution scientifique ». *Philosophy World Democracy*, 1 septembre [English: \(Precaution-sci-NGT-English\)](#)
- Longo G. (2025) Emergence vs Novelty Production in Physics vs Biology, to appear, Proceedings of *Open Historicity of Life. Theory, epistemology, practice*, Paris, October, 2023 (Chollat, Montévil, Robert eds.).
- Longo G. (2026) The dialectic between nature and culture in the interplay between the discrete and the continuum, to appear in Special Issue "Patterns: The Discrete and the Continuous" of "Theory, Culture and Society".
- Longo G., Longo S. (2020) Infinity of God and Space of Men in Painting, Conditions of Possibility for the Scientific Revolution. In 'Mathematics in the Visual Arts' (R. Scheps and M.-C. Maurel ed.), ISTE-WILEY Ltd, London.
- Longo G., Longo S. (2021) Réinventer le corps et l'espace, *In difesa dell'umano* (a cura di Boi et al.), Vivarium Novum.
- Longo G., Milsted K., Soloviev S. (1993) The Genericity Theorem and effective Parametricity in Polymorphic lambda-calculus. *Theoretical Computer Science*, 121:323--344
- Longo G., Palamidessi C., Paul T. (2010) Some bridging results and challenges in classical, quantum and computational randomness. In "Randomness through Computation", H. Zenil (ed), pp. 73–92, World Scientific.
- Martin-Löf. (1966). The Definition of Random Sequences. *Information and Control*, 9(6), 602-619.
- Monod, J. (1970). Le Hasard et la Nécessité. In *Le Seuil Coll. Points*.

- Montévil M. (2022) Historicity at the heart of biology, *Theory of Biosciences*, 165–173.
- Mugur-Schachter M., Longo G. (Editors) 2014. *Developments of the Concepts of Randomness, Statistic, and Probability*, Special issue of [Mathematical Structures in Computer Science](#), Cambridge U. P., vol.24, n.3.
- Odifreddi P.G. (1999). *Classical Recursion Theory*, vol. 1-2. Amsterdam: North Holland.
- Petitot J. (2017) *Elements of Neurogeometry: Functional architectures of vision*", Springer.
- Rogers, H. (1967). *Theory of recursive functions and effective computability* (McGraw-Hil)
- Rudyak Yu. B. (2008). On Thom Spectra, Orientability, and Cobordism. Dordrecht: Springer.
- Sarti, A., Citti, G., Piotrowski, D. (2022). *Differential Heterogenesis*. Lecture Notes in Morphogenesis. Springer.
- Stewart, J., (2004) *La vie existe-t-elle*. Vuibert, Paris.
- Teissier B. (2005) Protomathematics, perception and the Meaning of Mathematical Objects », in P. Grialou, G. Longo et M. Okada (Dir.), *Images and Reasoning*, [Keio University Press](#), Tokyo: p. 135-146.
- Vitali-Rosati M. (2024) Éloge du bug. Être libre à l'époque du numérique, *Zones*, Paris
- West-Eberhard M-J. (2003) *Developmental Plasticity and evolution*. Oxford U. Press, New York.