

Prefazione a: ***Il Liceo matematico: un approccio storico e interdisciplinare all'insegnamento delle scienze e della matematica***

di A. Nigrelli e F. S. Tortoriello (Mimesis, 2025)

L'invenzione matematica e scientifica, al di là dei miti tecnoscientifici

Giuseppe Longo

CNRS & Ecole Normale Supérieure, Paris

<https://www.di.ens.fr/~longo/>

[...] la domanda consueta, se le Matematiche debbono educare piuttosto l'intuizione o la logica, è viziata per una imperfetta visione del valore dell'insegnamento. Infatti il presupposto di codesta domanda è che logica ed intuizione si lascino separare come facoltà distinte dell'intelligenza, laddove esse sono piuttosto due aspetti inscindibili di un medesimo processo attivo, che si richiamano l'un l'altro.

F. Enriques, *Scienza e razionalismo*, Zanichelli, Bologna 1912

Federigo Enriques (1871-1946), uno dei grandi della scuola di Geometria Algebrica italiana, può essere considerato un precursore del quadro concettuale che è proposto da questo libro. Per Enriques la matematica non si poteva analizzare senza l'esplicitazione di una filosofia e di una sua storia e, viceversa, la filosofia, doveva sempre confrontarsi con gli sviluppi della matematica e della scienza in generale. Pubblicamente e violentemente criticato da Benedetto Croce per essersi permesso di organizzare un convegno di filosofia, nel 1911 a Bologna, lui, matematico, quindi "tecnico senza conoscenza", aprì una vivacissima polemica con Croce e, poi, con Gentile. Nello scambio, per il tramite di vari articoli, Enriques delineò, con grande competenza, anche filosofica, un dialogo serrato fra filosofia e scienza¹. La polemica durò a lungo, per poi esser stroncata ed Enriques sconfitto in quel che più gli stava a cuore: l'intreccio fra matematica e filosofia nell'insegnamento scolastico. Con il fascismo, filosoficamente alleato a Croce su questi temi, e con la riforma della scuola, avviata sin dagli albori del regime dal neo-ministro Gentile (1923), la visione di Enriques venne totalmente esclusa nel disegno dei programmi. In particolare, nel Liceo Classico, luogo di preparazione della élite del paese, l'unico che permetteva l'accesso a tutte le facoltà universitarie, il tempo ed il ruolo delle scienze e della matematica si riduceva a pochissimo, si evitava nei programmi ogni contaminazione di pensiero e, sia detto per inciso, si escludevano le donne (fra queste la madre di chi scrive, giovanissima professoressa alla fine degli anni '30²) dalla formazione del vero uomo ed intellettuale fascista.

Perché il ruolo attribuito da Enriques alla "intuizione" nella citazione più in alto? Con essa, nella filosofia e nella pratica della matematica, si è per lo più inteso un "vedere" l'oggetto di conoscenza, un accesso diretto al sapere, al capire, un "insight", dice Hermann Weyl³, essenziale all'invenzione ed alla prova in matematica. E' un "vedere la struttura matematica", che, nella

1 Faracovi O., Speranza F. (1998) *Federigo Enriques. Filosofia e storia del pensiero scientifico*, Belforte, Livorno

2 Frattolilli R., Bertolini B. (2001) *Il tempo sospeso. Donne nella storia del Molise*. Filopoli.

3 Weyl, H. (1949) *Philosophy of Mathematics and Natural Science*, Princeton

tradizione che ha le sue radici in Platone ed in Sant'Agostino, precede il mondo e che si ritrova, sia pure in modo diverso, in Descartes ed in Kant. Tutti questi pensatori, ma anche Wittgenstein ed Husserl nel XX secolo, intrecciano la loro filosofia con riflessioni sulla matematica. Si parla a lungo di questi filosofi nel libro, dove si osserva che *“la matematica ha determinato la direzione e il contenuto di buona parte del pensiero filosofico”*. La logica e l'intuizione, di cui parla Enriques, sono entrambe al cuore di questa co-costruzione, fra matematica e teorie della conoscenza. Dico co-costruzione, perché è vero anche il contrario: il quadro storico di pensiero di un'epoca è un intreccio di saperi in cui la filosofia e la matematica hanno un ruolo peculiare nell'esplicitare i principi di conoscenza, fecondandosi reciprocamente. La geometria di Euclide è certo una “teoria della misura delle figure piane”, ma è anche un dialogo con gli dei, è uno sviluppo di “idee” platoniche, quindi di tutta una filosofia – Proclo annovera Euclide fra i più giovani discepoli di Platone. Sarà poi una filosofia teologica che ispira l'invenzione della prospettiva pittorica nel '300 italiano. Sono pittori-frati, Ambrogio Lorenzetti in primis, che “pongono l'infinito nel quadro”, la linea e punto prospettici, per evocare la presenza di Dio nell'Annunciazione (1344)⁴. Nasce così la prima rappresentazione matematica dell'infinito *in atto*, il punto di convergenza lì giù, all'infinito, diverso dall'infinito *in potenza*, quello di linee o di sequenze di numeri tracciate o crescenti “senza limite” (apeiron), già così ben trattato da Euclide. Vedendo, in realtà costruendo il punto di convergenza all'infinito, si propone una nuova “intuizione” di un concetto difficile, si “mostra” l'infinito matematico e, con esso, lo spazio matematico tri-dimensionale poi essenziale alla geometria della rivoluzione scientifica⁵. L'intuizione matematica, che è sempre il risultato di una storia, di un'epoca, è particolarmente efficace quando è non solo “visione” passiva, ma è prodotta, costruita attivamente. La sua origine, in questo caso, è un gesto “teologico-pittorico”, dice Arasse (v. nota), filosofico ed artistico quindi, che precede e fonda la geometria di Piero della Francesca, pittore e matematico⁶, poi di Descartes e Desargues, nel '600. Viceversa la geometria di Riemann, al cuore della svolta relativistica in fisica, precederà la filosofia di quest'ultima, come la matematica “sintetica” di Grothendieck verrà seguita dalla riflessione filosofica – filosofie che integrano, arricchiscono la scienza nel suo rapporto al mondo⁷.

La matematica dunque come uno degli strumenti per rendere intelligibile il reale, organizzandolo, come nello spazio tridimensionale della prospettiva italiana. Ma così fa anche il linguaggio nella costruzione comune del mito, della legge umana o divina, che organizzano la nostra comunità umana. *“Le teorie matematiche vanno considerate non più come l'unico strumento universalmente valido per la conoscenza del mondo bensì come una delle possibili modalità con cui l'uomo pensa il reale”* si osserva nel libro. Fra i tanti strumenti, la matematica è caratterizzata dalla stabilità, dall'invarianza concettuale massimale: quando si propone, con la definizione, l'assiomatica... una struttura, un oggetto matematico, lo si intende perfettamente stabile, a-temporale. Con Euclide, abbiamo imparato la peculiare invarianza della costruzione matematica. Poi, la storia si incaricherà di modificare nozioni e strutture, di render “molliti” i triangoli di Euclide in spazi Riemanniani curvi, modificandone le simmetrie. Così la fisica, cattura, con le equazioni di Newton e di Hamilton, le nozioni vaghe ed intercambiabili nel linguaggio ordinario di “forza” ed “energia”, e dà loro una “dimensione” diversa, ben precisa, di tipo fisico-matematico. Grazie alla matematica, tali nozioni non sono “metafore” in fisica, ma termini

4 Arasse, D. (1999) *L'Annonciation Italienne. Une Histoire de Perspective*. Paris: Hazan; Longo, S. *Daniel Arasse et le plaisir de la peinture*, Editions de la Sorbonne, 2022.

5 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, M.-C. Maurel ed.), ISTE-WILEY, London (tutti gli articoli recenti di chi scrive sono scaricabili da: <https://www.di.ens.fr/users/longo/download.html>)

6 Della Francesca, P. (1480) *De prospectiva pingendi*, un trattato di “geometria proiettiva” pratica, per pittori.

7 Per la prima, si veda fra i tanti: Cassirer E. (1921) *La teoria della relatività di Einstein*, trad. Castelveccchi, 2015; per la seconda: Zalamea F. (2012), *Synthetic Philosophy of Contemporary Mathematics*, Urbanomic (UK), Sequence Press (USA) (review in Longo, G. (2015) *Synthetic Philosophy of Mathematics and Natural Sciences, Conceptual Analyses from a Grothendieckian Perspective*, in *Journal of Speculative Realism*, December).

scientifici, rigorosi⁸. Potremmo dire che, quando si pone una stabilità ed invarianza massimale, si sta facendo matematica, anche senza saperlo. Inoltre la matematica è antichissima: condividiamo il “contare piccoli numeri” con molti animali⁹, sappiamo tracciare e precedere con lo sguardo una traiettoria, di una preda, un predatore¹⁰. Queste sono “praxes” di tipo matematico o pre-matematico, ci torneremo. Certo, l’animale senza linguaggio umano, non propone l’invariante di “numero”, né di “traiettoria”, una linea, come concetto, ma lo *pratica*: i leoni comparano il proprio gruppo di quattro individui con i sei ruggiti diversi che si avvicinano e, prudenti, si allontanano. Corpi e suoni, fisicamente molto diversi, sono comparati numericamente, per agire, senza per questo che sia proposto l’invariante concettuale, eminentemente linguistico, anzi, come osserva Husserl, che si stabilizza veramente solo nella scrittura, del numero in questo caso¹¹. Ha ragione Brouwer, padre fondatore, un secolo fa, della logica intuizionista, a far riferimento alla pratica della sequenza temporale discreta, il contare il tempo, nella costruzione della sequenza dei numeri interi, ma è la costituzione dell’invariante che è comune a questa e ad almeno un’altra pratica, l’apprezzare ad esempio la “numerosità” nello spazio, ovvero l’ordinare contando¹², che permette di produrre la struttura matematica concettualmente stabile, invariante, la sequenza ordinata dei numeri. E’ la pluralità di “atti di esperienza” (H. Weyl), il coglier quel che hanno in comune e che basta all’azione, che rendono possibile la costruzione, pratica o concettuale, dell’invariante matematico.

Così, il nostro cervello animale “*crea mondi a partire dal corpo che agisce grazie alla flessibilità e alla molteplicità dei meccanismi di manipolazione nello spazio*”, scrive Alain Berthoz citato nel libro. Questa è “*la dimensione “incarnata” del processo cognitivo, ... sintesi di percezione ed azione*”. La diversità dei sistemi di riferimento, articolari, muscolari, visivi, rendono possibile una pratica stabile/invariante dell’azione nello spazio, e, poi, molto dopo, la sua specificazione matematica. Per Poincaré (1854-1912), un matematico spesso citato nel libro, “*la nozione di gruppo emerge grazie all’esperienza, pur senza essere determinata da essa. Ed è proprio sul ruolo giocato dalla nozione di gruppo in matematica che si fonda il convenzionalismo geometrico di Poincaré che pertanto risulta coerente con la sua visione dell’incidenza dell’esperienza sensibile sulla formazione del concetto di spazio*”. Un convenzionalismo dunque che non è “arbitrario” (pongo per convenzione quel che mi pare) ma risulta “il più conveniente”, dice Poincaré, per agire in questo mondo, con i nostri corpi. O, forse, si tratta solo di convenzioni possibili, che funzionano, dice l’evoluzionista che è in me. Certo, successivamente, per avere lo spazio geometrico infinito, tridimensionale, della rivoluzione scientifica, di Descartes, Desargues e Newton, si passerà anche, si diceva, per la Teologia.

Così, nello spazio dell’azione, nella caccia, si impara a seguire e precedere, con lo sguardo ed il movimento, una traiettoria indipendentemente dalla preda che si segue e dai dettagli dell’ambiente in cui ci si trova, per poter iterare l’azione – un’altra “pratica” di un invariante matematico: la traiettoria astratta dal contesto, una prassi al cuore dell’apprendimento in tanti animali, noi compresi ovviamente. Così, grazie, ad esempio, allo “isomorfismo di Poincaré-Berthoz”¹³,

8 Lo si raffronti all’uso vago e metaforico di locuzioni come “informazione” e “programma genetico” in biologia molecolare: Longo, G., Mossio, M. (2020) Geocentrism vs genocentrism: theories without metaphors, metaphors without theories. *Interdisciplinary Science Reviews* 45, 380–405; Longo, G. (2019). Information at the Threshold of Interpretation, Science as Human Construction of Sense. In Bertolaso, M. & Sterpetti, F. (Eds.) *Will Science Remain Human?* pp. 67-100, Springer, New York.

9 Dehaene S (1997) *La Bosse des Maths*. Editions Odile Jacob, Paris.

10 Berthoz A. (1998) *Il senso del movimento*, McGraw-Hill.

11 Husserl E. (1932) *L’origine della geometria*.

12 Dehaene S (1997) *La Bosse des Maths*. Editions Odile Jacob, Paris.

13 Teissier, B. (2005) Protomathematics, perception and the meaning of mathematical objects, in *Images and Reasoning*, edited by P. Grialou, G. Longo, M. Okada, CIRM, Keio University, Tokyo; vedi anche: Longo, G., Petitot, J., Teissier, B., 1999, “Motivations” e “Introduction”, in “*Géométrie et cognition*”, <http://www.di.ens.fr/users/longo/geocogni.html>.

discusso nel libro, si identificano la retta tracciata dalla saccade oculare¹⁴ che precede il percorso da fare e quella individuata dal sistema vestibolare¹⁵ nella marcia; si costruisce allora un invariante fra visione e movimento. Di lì, il percorso per arrivare a proporre il *concetto* di linea è lungo. Oso pensare che un gesto antichissimo, di natura eminentemente matematica, l'abbiano fatto i nostri antenati molte decine di migliaia di anni fa, quando hanno interpolato le stelle con delle linee che non esistono e dato contorni e nomi a costellazioni, dando così senso, mitico probabilmente, a quei punti luminosi senza senso nel cielo. Hanno cioè “immaginato delle configurazioni di senso”. Poi, a Lascaux ed Altamira, oltre 15.000 anni prima della nostra era, degli umani hanno disegnato sulle pareti di grotte delle linee, dei bordi: il bordo di un cavallo, di un bisonte... Gli oggetti non hanno bordi: è a partire dalla corteccia visiva primaria che il cervello, in molti vertebrati, li costruisce intorno agli oggetti¹⁶; quindi, noi umani, e solo noi, che io sappia, arriviamo a trasformare questa traccia nei neuroni, questa “invenzione fisiologica” del cervello animale, in una forma di comunicazione pittorico-matematica fra umani, a disegnare figure come puri bordi sulle pareti di una grotta, probabilmente ricche di un simbolismo mitico. Fino ad arrivare alla splendida definizione beta, nei libri di Euclide: la linea è una lunghezza senza spessore. Allora, il tracciare si unisce al linguaggio: l'allievo capirà cosa è una *linea continua* solo quando vedrà il gesto, la traiettoria della mano, la linea tracciata sulla lavagna dal maestro; ma solo nel linguaggio questi potrà aggiungere, come Euclide: la linea che traccio è senza spessore – ad un tempo una assurdità e l'invenzione della nozione matematica di bordo, profondissima – le figure geometriche di Euclide non sono che bordi¹⁷. E questo è far matematica, un intreccio fra gesto geometrico, un invariante dell'azione sul piano o nello spazio, e linguaggio, da Euclide a Piero della Francesca: esempi paradigmatici di proposte di concetti e strutture, non arbitrarie, perché ricche di senso. Tutta la matematica è una permanente invenzione di nuovi concetti e strutture: non c'è dimostrazione profonda ed originale, che non ne richieda l'invenzione di nuovi. Questa è l'incompletezza primaria di ogni formalismo deduttivo: solo a posteriori, si possono e si devono esplicitare le nozioni, i principi, per altro sempre nuovi, non sempre applicabili come regole formali-meccaniche¹⁸. Persino la prova di un semplice enunciato aritmetico (l'enunciato dell'“ultimo teorema di Fermat”) ha richiesto a Wiles un lungo percorso inventivo, la proposta di originalissime strutture matematiche¹⁹. E lo stesso nel lavoro di Grothendieck che risolve i problemi “sommargendoli, facendo montare un mare di nuove strutture e spazi matematici”, come usava dire, “sollevandoli” ad una nuova generalità. E questo a partire da Euclide, di cui spesso si insegna solo che ha inventato “il metodo assiomatico”. Certo, la costruzione euclidea si fonda sulla esplicitazione di principi (assiomi, definizioni) e sulla logica, ma questo è metà del lavoro. L'altra metà del contributo è l'invenzione della struttura primaria della matematica occidentale: la linea continua senza spessore, la nozione di bordo²⁰. Concettualizzazione invariante di molte pratiche

14 Movimenti degli occhi che orientano la fovea, regione centrale della retina di massima acutezza visiva, verso la zona di interesse.

15 Sistema di organi dell'orecchio interno la cui funzione principale è di garantire l'equilibrio e la postura eretta.

16 Hubel, D. H., Wiesel, T. N. (1963) Shape and arrangement of columns in the cat's striate cortex, in *Journal of physiology*, CLXV, pp. 559-568, un risultato classico che ha aperto la via ad analisi molto fini della corteccia visiva, anche di tipo matematico: Petitot J. (2017) *Elements of Neurogeometry: Functional architectures of vision*, Springer. Dal cervello alla matematica ed viceversa.

17 Nel XX secolo, René Thom ne proporrà una teoria matematica generale, il “cobordismo”, Rudyak Y. (2008) *On Thom spectra, orientability, and (co)bordism*, Springer.

18 Longo, G. (2011). Reflections on Concrete Incompleteness. *Philosophia Mathematica*, 19(3), 255-280.

19 Wiles A. (1995). "Modular elliptic curves and Fermat's Last Theorem". *Annals of Mathematics*, 141 (3): 443–551.

20 La caratteristica del “punto”, un semeion (segno), ovvero “il punto non ha parti”, è *derivata* e solo successivamente introdotta come definizione alpha. Nel testo di Euclide, il punto-segno è agli estremi di un segmento (definizione gamma), è prodotto dall'intersezione di due linee continue senza spessore (teorema 1, libro 1), *quindi* non ha parti, Longo G. (2011) Theorems as Constructive Visions. In (Hanna, de Villiers eds.) *Proceedings of ICMI 19 conference on Proof and Proving*, Taipei, Taiwan, May 10 - 15, 2009, Springer. Si noti che nel Rinascimento italiano se ne discuterà a lungo: per Alberti, la linea è costituita da una infinità di punti, come sarà per Cantor. Per Leonardo, la linea è il movimento di un punto e il piano la traslazione di una linea,

umane, si diceva, ma anche pre-umane: l'esperienza primaria della *continuità* di una linea include "l'incollamento", come si dice in geometria, fra la *retensione* (la memoria pre-cosciente, retinica e della corteccia primaria) della traiettoria seguita con lo sguardo e la *protensione* (anticipazione) della traiettoria attesa, rese possibili da saccadi oculari che permettono, nei vertebrati, di *seguire* e *precedere* una preda, un predatore²¹. Ovviamente, le esperienze corporee e cognitive accennate sono solo "condizioni di possibilità" per la costruzione concettuale, linguistica, storica, che segue.

Nel dire tutto ciò, sto facendo anche filosofia, ovviamente. Ovvero, sto proponendo, molto per sommi capi, una filosofia della conoscenza, di cui l'epistemologia della matematica fa parte, in quanto analisi di una possibile "genealogia di concetti", come vuole Riemann²², una sintesi degli "atti di esperienza" di H. Weyl, una "concettualizzazione storica progressiva" dice Enriques²³, basata su "la nostra attività umana nei nostri spazi di umanità", insiste Husserl²⁴. Una epistemologia è sempre ed anche una storia di concetti nell'intreccio delle forme di conoscenza, da affinare con l'apporto dello storico - questo è l'altro grande insegnamento del libro: *"si tratta di assumere una visione "storica", interna all'evoluzione del genere umano, dei livelli più profondi del trascendentale. In questo modo, si passa da una considerazione della ragione come separata dai soggetti empirici, ossia disincarnata, ad una che va analizzata nel suo dinamico concretizzarsi negli individui che naturalmente sono portatori di interesse tendenti ad un oggetto, ad uno scopo"*. Ovviamente, qui, come a l'Habermas molto opportunamente citato nel libro, interessa soprattutto la *"costituzione del trascendentale"* più che il trascendentale, ovvero il possibile percorso costitutivo delle idealità matematiche, profondamente radicato nel mondo, anche se noi umani, poi, tendiamo a porle fuori dal mondo. Non è, come dice Galileo, la natura ad essere scritta nel linguaggio della matematica, ma è la matematica ad essere scritta nelle pratiche e nel linguaggio naturali e storici. In questo modo si riesce a costruire un *"dialogo tra la cultura umanistica e la cultura scientifica"*, come auspicano gli autori, a *"recuperare il legame inscindibile tra scienza e filosofia mediante un metodo in grado di far emergere il significato della scienza per la vita dell'uomo"* e dalla vita dell'uomo.

Scienza e tecnoscienza nel gioco fra continuo e discontinuo (discreto).

Il libro è in particolare indirizzato alla *"platea dei docenti delle istituzioni scolastiche, ossia di coloro che sono chiamati ad essere in prima linea nel guidare e orientare le giovani generazioni in un'epoca, come quella contemporanea, in cui troppi fattori sembrano condurre alla pericolosa affermazione di una hybris della tecnoscienza ben lontana - soprattutto nei suoi effetti dogmatici e totalizzanti, da una genuina vocazione critica e scientifica."* Affrontiamo allora un aspetto matematico specifico, che è uno degli elementi della hybris (od arroganza) delle tecnoscienze oggi più potenti e ricche e per la cui critica l'insegnamento scolastico può avere un gran ruolo. Mentre il libro, soprattutto centrato sulla riflessione filosofica, è orientato anche ai lettori con poca esperienza scientifica, vorrei provare ora a chiedere a chi legge un piccolo sforzo, per due

Longo G., Longo S. (2022) Reinventare il corpo e lo spazio, *In difesa dell'umano* (a cura di Boi, Curi, Maffei, Miraglia), Vivarium Novum. Il gesto, il movimento, l'azione nello spazio, sono primari, nella produzione matematica (e pittorica), per Euclide e Leonardo.

21 L'analisi fisiologico-cognitiva delle saccadi oculari è molto rilevante in Berthoz A. (1997) *Il senso del movimento*, (citato); v. anche Longo G. (cur.), (2004) *Introduction à Géométrie et cognition*, numéro spécial de la *Revue de Synthèse*, Editions de la rue d'Ulm, t. 124 e Longo G. (2022) *Matematica e senso*, Mimesis.

22 Bottazzini U, Tazzioli R (1995) Naturphilosophie and its role in Riemann's Mathematics, *Revue d'Histoire des Mathématiques*, n. 1, 3-38.

23 Enriques F (1935), Philosophie scientifique et empirisme logique. In: *Actes du Congrès international de philosophie scientifique*, Hermann, Paris; Faracovi O., Speranza F. (1998) *Federigo Enriques. Filosofia e storia del pensiero scientifico*, Belforte, Livorno.

24 Husserl E. *L'origine della geometria*, 1932. Per una sintesi del rapporto fra la filosofia di Husserl ed il pensiero di H. Weyl, si veda Patras F. (2009) Hermann Weyl : science et humanisme au XXème siècle, in A. Einstein et H. Weyl 1955-2005. Dir C. Alunni, M. Castellana, D. Ria et A. Rossi, Paris, Eds Barbieri Selvaggi Editori et Editions rue d'Ulm, 175-193

paragrafi, per cogliere una questione matematica, di grande rilievo filosofico, a mio avviso, in particolare per combattere certa hybris tecno-scientifica.

Réné Thom osserva che il gioco fra “continuo” e discreto” è l’aporia o tensione interna fondamentale della matematica²⁵. Filosoficamente, il mondo non è né continuo né discreto, è quello che è. Ma noi lo organizziamo in modo molto diverso e non arbitrario con la matematica del continuo o del discreto. E’ nel continuo che Poincaré ci ha spiegato che la *determinazione* classica (ad esempio la scrittura di un sistema di equazioni) non implica la *previsibilità* di una dinamica; lo ha fatto partendo dalle fondamentali equazioni di Newton-Laplace della dinamica di due pianeti nel campo gravitazionale del Sole, i cui campi gravitazionali interagiscono: il problema dei Tre Corpi²⁶. In sistemi di equazioni non lineari, la fluttuazione, la perturbazione al di sotto della misura fisica, sempre un intervallo (nel continuo), può causare dinamiche divergenti ed imprevisibili nel tempo. Questo ha demolito l’ipotesi di Laplace che la determinazione, in quanto la scrittura delle equazioni o di una funzione d’evoluzione, implichi la prevedibilità del sistema. Tutto l’aleatorio della fisica classica (e relativistica), ci ha insegnato Poincaré, è “determinazione imprevedibile”: sappiamo, a priori, che anche il percorso che faranno i dadi è di certo una geodetica, una traiettoria ottimale, ma anche se si scrivesse una caterva di equazioni per determinarla (descrivendo tutte le forze che lo influenzano causalmente), le frizioni e le perturbazioni al di sotto della miglior misura fisica, quindi “nascoste alla misura”, ne renderebbero comunque imprevedibile la traiettoria ed il suo termine²⁷.

Nel discreto, invece, in un mondo fatto di sequenze di 0 ed 1 ad esempio, è la causalità stessa che scompare: è questo il nodo del grande dibattito fra Einstein e Bohr, negli anni ‘30. Per Bohr, lo spin-up / spin-down di un elettrone, uno 0 / 1, è “senza causa”, è pura contingenza e lo assume. Così, per Heisenberg e tanti altri, l’indeterminazione della misura quantistica è intrinseca, non è dovuta ad una “approssimazione” sempre migliorabile: produce comunque solo probabilità che accada questo o quello. Per Einstein invece (e poi per Bohm ed altri) un fenomeno misurabile, anche nel discreto come lo spin di un elettrone, deve dipendere, causalmente, da variabili nel continuo, eventualmente nascoste. Nel continuo, e questo è cruciale, perché le leggi di conservazione (dell’energia, della quantità di moto od inerzia...), che rendono intellegibile la causalità fisica e sono dietro tutte le equazioni, ovvero dietro la determinazione classica e relativistica, sono descrivibili come *simmetrie continue*²⁸. Ma allora, se Bohr ed Heisenberg hanno ragione, il mondo è discreto ed a-causale? Dipende dalla scala, per ora non c’è unità fra microfisica quantistica e spazi classici o relativistici... E comunque, i fenomeni di intricazione quantistica, dedotti con grande finezza in un articolo del 1935 da Einstein e collaboratori e da loro considerati assurdi (incoerenti), ma poi verificati²⁹, vietano ogni idea dei quanta come un universo

25 Una struttura matematica è (topologicamente) “discreta”, quando tutti i punti sono “isolati”, aperti e chiusi, quindi accessibili esattamente alla misura – si pensi ai numeri interi.

26 Poincaré, H. (1892). *Les méthodes nouvelles de la mécanique céleste, Tome I*. Gauthier-Villars ; Charpentier, E., Ghys, E., Lesne, A., Lagueës, M. (2006). *L’héritage scientifique de Poincaré*, Belin.

27 Attenzione poi: il discreto, i pixel dello schermo di un computer per dire, possono essere una approssimazione (crescente con il loro numero) di una immagine statica. Invece, appena c’è una dinamica non-lineare, ovvero che descrive delle interazioni nel movimento (come tre corpi celesti), il discreto non segue (non approssima che per poco tempo) la dinamica reale né quella descritta nel continuo - la prima esperienza didattica di chi scrive, in Metodi di Approssimazione Numerica, v. Pilyugin, S. Y. (1999). *Shadowing in Dynamical Systems*, Springer. In IA, certuni pretendono di simulare (e rimpiazzare) il cervello quando non conoscono le difficoltà della simulazione numerica di un doppio pendolo (<https://math24.net/nonlinear-pendulum.html>), vedi Coveney P., Highfield R. (2024) Artificial Intelligence Must Be Made More Scientific, *Journal of Chemical Information and Modeling*, July 27. Inoltre, nel discreto, la più caotica delle dinamiche, la simulazione di un uragano ad esempio, itera in modo identico, basta far “restart”, poiché può partire esattamente dagli stessi pixels, una assurdità fisica.

28 Questo dimostrano i teoremi di Noether (1918) ed il lavoro di H. Weyl, v. Kosman-Schwarback, Y. (2010). *The Noether theorems : Invariance and conservation laws in the twentieth century*, Springer; Longo, G., Montévil M. (2014). *Perspectives on Organisms: Biological Time, Symmetries and Singularities*. Dordrecht: Springer.

29 Aspect, A., Grangier, P., & Roger, G. (1982). Experimental Realization of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm Gedankenexperiment: A New Violation of Bell’s Inequalities. *Phys. Rev. Lett.*, 49(2), 91-94.

di punti distinti e ben separati, nel discreto: misure di eventi lontani non permettono di separare gli osservabili misurati, contro la nozione stessa di “struttura discreta”, fatta di punti accessibili e separabili, come i bits di un computer. La fisica quantistica ci propone una immagine del mondo originale e difficile, intricata, discreta e continua ad un tempo (contrariamente all’elettrone vincolato, lo spettro energetico dell’elettrone libero è continuo), o, forse, nessuna dei due.

Passiamo ora da un bellissimo dibattito scientifico, alle tecnoscienze, dove l’assenza di visione filosofica (o la sua povertà) provoca distorsioni gravissime. La Teoria delle Calcolabilità, cui ho a lungo contribuito come matematico, nata in Logica Matematica negli anni ‘30 (Gödel, Church, Turing...) è una bellissima teoria del discreto: la si dà sui numeri interi. Poi, molto lavoro si è fatto per la calcolabilità nel “continuo” (o quasi continuo) e per interpretarla in strutture geometriche continue (parte del lavoro di chi scrive). Ma la macchina che la implementa, il computer contemporaneo, è una “macchina a stati discreti”, come la definisce il suo fondatore, Alan Turing. Anche il recente Deep Learning della nuova Intelligenza Artificiale (IA), che usa e sviluppa potentissimi metodi matematici nel continuo, spesso provenienti dalla fisica matematica (metodi di ottimo, ondine, ri-normalizzazione)³⁰, in fin dei conti deve essere sempre implementato nella macchina a stati discreti, in sequenze di 0 ed 1. Anche se alcune “forme” che emergono nelle dinamiche matematiche descritte con il Deep Learning somigliano a dinamiche cerebrali (nel riconoscimento del linguaggio, si riescono a riprodurre dinamiche che si intravedono nella corteccia cerebrale – o si può utilizzare la stessa matematica nel descriverle), il cervello animale non ha “dietro” o “sotto” una macchina a stati discreti che fa i conti, come il Deep Learning, tecnologia fantastica. Ovvero, l’immagine del “pensiero” che l’IA ci rinvia, è sempre quella di un calcolo su numeri interi. Come dicono certi filosofi: “quel che non può esser calcolato, non può esser pensato”³¹. Sequenze di 0 / 1 e calcoli nel discreto, algoritmi, questo è il loro mondo. E Pearl e Valiant, entrambi Turing Awards (il Nobel dell’Informatica), ci spiegano che le leggi della fisica e della biologia sono algoritmi (arricchiti da correlazioni statistiche fra i dati numerici, per Pearl; “ecoritmi”, dice Valiant per dar rilievo all’interazione fra programmi)³². Ottimi tecnici nella loro disciplina, proiettano sul mondo quel che sanno fare, senza alcuna riflessione critica. Quindi, in un mondo algoritmico, una pietra cade perché “programmata per cadere” (v. anche gli scritti di Stephen Wolfram), proprio come accade sullo schermo di un computer. Per fortuna, Einstein ci ha spiegato che una pietra cade “per ragioni di simmetria”³³ e la fisica va avanti trascurando tali sciocchezze. Non è così per la biologia, dove, in assenza di una “Teoria dell’Organismo” (ontogenesi), malgrado il ricco dibattito teorico in Teoria dell’Evoluzione (filogenesi), da Darwin in poi, si continuano a evocare vaghe metafore informatiche per parlar del vivente (v. note). E si racconta così che “possiamo controllare l’evoluzione”, riprogrammando gli organismi³⁴. Tecniche difficili giustificano questa arroganza (*hybris*), con ricadute modestissime, soprattutto rispetto le promesse³⁵.

30 Le Cun Y. (2023) *Quand la machine apprend. La révolution des neurones artificiels et de l'apprentissage profond*. Odile Jacob, Paris

31 Ladyman, J., Ross D. (2008) *Every Thing Must Go, Metaphysics Naturalized*, Oxford U.P.; ovvero, quel che non può essere calcolato dalle macchine prodotte o gestite dai GAFAM, non può essere pensato.

32 Pearl J., Mackenzie D. (2018) *The book of why. The new science of cause and effect*, Basic Book, NY; Valiant L. (2013) *Probably approximately correct*, Basic Books.

33 L’equivalenza relativistica fra gravità ed inerzia fa capire la prima nei termini dei teoremi di Noether citati: l’inerzia è un principio di conservazione, quindi una proprietà di simmetria (una simmetria di traslazione spaziale).

34 Doudna J., Sternberg S. (2017) *A crack in Creation: Gene Editing and the Unthinkable Power to Control Evolution*, Bodley Head, London; per un resoconto critico: Longo G. (2021). Programming Evolution: a Crack in Science. *A Review of the book by Nobel winner, J. A. Doudna, and S. H. Sternberg*, in *Organisms. J. Bio Sci.*, Vol. 5, No. 1. Ai numerosi articoli lì citati sugli effetti “off-target” ed inattesi sul DNA, si aggiunga Martins Hoepers A. et al. (2024) Predicted multispecies unintended effects from outdoor genome editing, *Ecotoxicology & Environmental Safety*, Vol. 282: l’assenza di controllo sugli effetti collaterali degli OGM è una delle ragioni dei fallimenti sul continente americano ed in India (v. nota più sotto).

35 Dopo il sequenziamento del genoma umano, quanto a promesse, basti il titolo di von Eschenbach, A. C. (2003). NCI [Nat. Cancer Inst.] sets goal of eliminating suffering and death due to cancer by 2015. *Journal of the National*

Un nuovo Pitagorismo Imperativo

E' allora lecito dire che abbiamo a che fare con due tecnoscienze accomunate da un nuovo *Pitagorismo Imperativo*: non solo l'essenza del mondo sarebbe nei numeri interi, come dicevano i pitagorici (o in sequenze di lettere, il DNA, il che è la stessa cosa) o comunque codificabile in essi, ma, escludendo così la causalità fisica, come Einstein e Bohr avevano capito, si fa funzionare il mondo come il computer digitale - dando ordini. Infatti, anche i linguaggi di programmazione funzionali od "orientati ad oggetti", molto usati in IA, devono comunque ridursi a sequenze di ordini per funzionare (teoremi di Church-Rosser³⁶ e di Normalizzazione³⁷); inoltre, la loro gestione nel computer con compilatori e sistemi operativi è basata su ordini, è *imperativa* (è implementata in linguaggi detti imperativi). Ed una pietra nera cade sullo schermo perché i pixel implementano ordini che li fan diventare bianchi e neri in successione. Così andrebbe anche il mondo e la cognizione. Per di più, oltre la causalità, si perde anche la nozione geometrica di dimensione. Infatti quel che è geometrico è "sensibile alla codifica". Non si possono codificare spazi continui, da Descartes a Riemann, di più dimensioni e con topologie "naturali", in una sola dimensione: si perde quel che conta, la continuità e con essa, si diceva, la causalità classica e relativista. Si pensi che per rappresentare tre dimensioni in due, con la prospettiva della pittura italiana, si è dovuta inventare la prima rappresentazione simbolica dell'infinito ("in atto"): il punto di convergenza delle rette parallele, il punto prospettico, risultato di oltre 1000 anni di dibattito sull'infinito di Dio (in potenza, in atto?)³⁸. Nel discreto, invece, qualsiasi numero di dimensioni spaziali è codificabile nella sequenza unidimensionale di 0 ed 1 di un computer: il discreto è insensibile alla codifica. E la parola d'ordine comune all'IA ed alla biologia molecolare dominante è: codifica, codifica... "all is code", tutto è (riducibile a) codice lineare, alfa-numerico. Una catastrofe concettuale, se estesa al mondo: si cancellano 2500 anni della sua intelligibilità matematica e fisica, della sua strutturazione causale e spaziale, rimpiazzandola con ordini codificati con quattro lettere o 0 ed 1 allineati. Ottima tecnologia quest'ultima, basata per di più su un dualismo radicale, le distinzione fra hardware e software: splendida idea di Turing per far macchine (1936), un disastro cognitivo e di conoscenza se proiettata sulla materia inerte e vivente.

La mia lunga ed iterata esperienza americana, mi suggerisce un motivo del successo di tali visioni nella Silicon Valley ed altrove. Da moltissimi anni, nei licei americani si insegnano esclusivamente matematiche computazionali, direttamente programmabili nella macchina a stati

Medical Association, 95(7), 637-639, e nel giro di due e tre anni si sarebbero dovute fare diagnosi e prognosi del cancro analizzando il DNA. Invece, il sequenziamento del DNA non aiuta a distinguere un tumore primario da uno metastatico (Weinberg, R. (2014) "Coming Full Circle - from endless complexity to simplicity and back again", *Cell* 157, March 27.); in effetti, "63 to 69% of all somatic mutations [are] not detectable across every tumor region ... Gene-expression signatures of good and poor prognosis were detected in different regions of the same tumor" (Gerlinger, M et al. (22 authors) (2012) "Intratumor Heterogeneity and Branched Evolution Revealed by Multiregion Sequencing", *Engl J Med* 366; 10, march 8) e si osservano tumori senza mutazioni (Versteeg, R. (2014) "Tumors outside the mutation box", *Nature*, vol. 1.). Ed ancor oggi solo l'istologo, guardando il tessuto e la forma delle cellule al microscopio *ottico*, capisce se il tumore è maligno, benigno, primario, metastatico. Si pensi poi al GWA (Genome Wide Association), progetto finanziato per 10 anni con 8 miliardi di dollari (!) con lo scopo di associare malattie di ogni sorta ai "geni": una montagna (di soldi) che ha prodotto qualche topolino, vedi Heeney, C. (2021). Problems and promises: How to tell the story of a Genome Wide Association Study? *Stud Hist Philos Sci* 89: 1-10; Baverstock K. (care of) (2024) *The Gene: An appraisal*, a Special Issue of *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, vol. 187, 1-77, Elsevier. In biologia, non esiste un livello causale privilegiato ed anche l'espressione genetica, importantissima, è una *rete* di geni attivati in interazione, la cui dinamica di rete è canalizzata da vincoli epigenetici, che vanno dal proteoma alla struttura/posizione della cellula nel tessuto, all'organismo, all'ecosistema, vedi Soto A., Longo G. (guest eds.) (2016) *From the century of the genome to the century of the organism: New theoretical approaches*, a Special Issue of *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, vol. 122, 1, Elsevier; Noble D. (2024) Genes are not the blueprint for life, *Nature*, vol. 626, February; Ball P. (2024) *How Life Works: A User's Guide to the New Biology*, Pan Macmillan.

36 Barendregt, H. (1984) *The Lambda-Calculus: its Syntax, its Semantics*. Amsterdam: North-Holland.

37 Girard, J.-Y., Taylor, P., & Lafont, Y. (1990). *Proofs and types*, Cambridge U. Press.

38 Zellini, P. (1980). *Breve storia dell'infinito*, Adelphi; Longo, G., Longo, S. (2020). Infinity of God and Space of Men in Painting, ... *citato*.

discreti. Se poi lo studente brillante continua gli studi in facoltà di informatica od ingegneria, non vedrà mai i gesti nel continuo di Euclide che dice: traccia una linea da un punto verso un altro (assioma 1), estendi con continuità un segmento in una linea (assioma 2), traccia un cerchio intorno ad un punto (assioma 3) etc³⁹, traiettorie continue, bordi, si diceva. Non coglierà mai veramente il rilievo delle deformazioni continue degli spazi di Riemann per capire la Relatività di Einstein, che è una dinamica di spazi metrici. Né le fluttuazioni nel continuo, al di sotto della misura fisica, cause quindi non misurabili dell'imprevisibilità dei sistemi deterministici (Poincaré contro Laplace, ricordato più su). E Pearl lo scrive: il mondo è come sostiene Laplace, determinista e prevedibile (male che vada, con metodi statistici, che usa con gran maestria), salvo per l'indeterminazione quantistica⁴⁰. Ed è proprio così in un universo digitale, fatto di punti ben separati, ed accessibili, esattamente: solo la misura quantistica, se necessaria, impedisce la prevedibilità. Così i colleghi che han studiato e lavorato solo nel numerico, implementato pietre che cadono grazie a cambiamenti di stato di pixel su uno schermo digitale, capiscono ed assentono⁴¹. Alcuni arrivano a sostenere, in articoli di gran successo, che i dati numerici (i Big Data) e la ricerca di regolarità in essi, con l'IA, possono sostituire il pensiero scientifico⁴²; per fortuna, la matematica ci dice che, più sono i dati numerici, più essi contengono regolarità dovute al caso, quindi insensate, spurie⁴³.

Così nella biologia molecolare dominante (per fortuna esistono alcuni dissidenti, eroici) si collezionano dati, tutti gli “-omics” possibili (genomics, proteomics, transcriptomics, glycomics, lipidomics...) sperando di avere risposte dall'osservazione di regolarità sui dati, senza una teoria dell'organismo, rimpiazzata da vaghe metafore numeriche imperative: “abbiamo decodificato le istruzioni scritte da Dio nel DNA di ogni organismo”, come dichiarava Collins nel 2001, in presenza di Clinton e Blair⁴⁴. Fra i dissidenti, Sydney Brenner (biologo molecolare, premio Nobel, 2002), osserva "Questa scienza degli '-omics' ci ha corrotto. Ha creato l'idea che se si raccolgono molti dati, tutto si risolve"⁴⁵. E si sviluppano così potenti tecnologie di estrazione ed elaborazione dei dati, in IA ed in biologia molecolare, di grande intelligenza ingegneristica, senza pensiero teorico, critico, da applicare senza far domande: una “proletarizzazione” del lavoro scientifico⁴⁶.

39 Tutti gli assiomi di Euclide massimizzano le simmetrie continue nelle figure generate; inoltre, diagrammi, rotazioni e traslazioni del piano, simmetrie continue, governano assiomi e prove, Longo G. (2011) Theorems as Constructive Visions. *Proceedings of ICMI 19 conference on Proof and Proving*, Taipei, Taiwan, May 10 - 15, 2009, (Hanna, de Villiers eds.) Springer. Per il ruolo dei diagrammi in Euclide, v. Panza M. (2012) The Twofold Role of Diagrams in Euclid's Plane Geometry”, in Janiak, Schliesser (éd.), *Interpreting Newton: Critical Essays*, Cambridge Univ. Press, Cambridge, pp. 55-102.

40 “This quasi-deterministic functional model mirrors Laplace's conception of nature [Laplace, 1814]... (only quantum mechanical phenomena exhibit associations that might conflict with the Laplacian model)”, Pearl J (2000) The Logic of Counterfactuals in Causal Inference, *J. Amer. Stat. Assoc.*, 95, 450. E l'imprevisibilità di Poincaré (1892) e Turing (1952)? la geometria dei sistemi dinamici, il “chaos deterministico”, da Kolmogorov (1953) a Ruelle (1971)? Ignorati: sono nel continuo, Ivancevic, V. G., Ivancevic T. T. (2008). *Complex non-linearity: chaos, phase transitions, topology change, and path integrals*. Springer.

41 Alan Turing è perfettamente cosciente che la sua macchina, il prototipo matematico del moderno computer (1936), è “laplaciana” e lo scrive (1950). Capendone quindi i limiti, si avventura nell'analisi della generazione di forme biologiche nel continuo, inventando equazioni non-lineari, non-laplaciane, ovvero che generano dinamiche deterministe ed imprevisibili, “triggered by a minor fluctuation” (1952). Ne parlo a lungo nella “lettera a Turing”, in appendice a Longo G. (2022) *Matematica e senso* (citato).

42 Anderson, C. (2008). The End of Theory: The Data Deluge Makes the Scientific Method Obsolete. *Wired Magazine*.

43 Calude, C., Longo, G. (2017). The deluge of Spurious Correlations in Big Data. In *Foundations of Science* Vol. 22, Issue 3, pp 595–612.

44 L'altro protagonista del sequenziamento del DNA umano, formidabile performance tecnica, C. Venter, riconosceva 9 anni dopo: Venter, C. (2010) We Have Learned Nothing from the Genome. *Der Spiegel*, July 29.

45 Citato in Parrington J. (2016) *The Deeper Genome: Why There Is More To the Human Genome Than Meets the Eye*. Oxford University Press.

46 Lo osserva Grothendieck (Grothendieck A. (1971) La nouvelle Eglise universelle, *Survivre... et vivre* n°9 Août-Septembre); lo spiegano con cura, oggi: Soto, A., Sonnenschein C. (2021) The proletarianization of biological

Tecniche paragonabili a quelle che da 150 anni ci permettono di estrarre ogni sorta di minerale e risorsa dalla Terra, arrivando fino ad 8000 metri di profondità per cercare il petrolio od altro, ed usarlo come fonte di energia o materie prime, senza limiti, con macchinari potentissimi, senza una teoria dell'impatto di tutto ciò sul complesso Terra-Oceano-Atmosfera. Solo da 20 o 30 anni, si è cominciato a pensare in modo organizzato e finanziato (poco), in fisica, in biologia, al loro impatto sull'ecosistema.

Filosofia e pensiero critico: i risultati “negativi” ed i nuovi quadri teorici

Citiamo di nuovo gli autori: “*Da quanto abbiamo detto, risulta evidente che nel secolo scorso i risultati straordinari della tecnica, con i suoi esiti drammatici e le pratiche disumanizzanti spesso indotte, ha stimolato la filosofia ad una approfondita riflessione su tutte le problematiche relative all'utilizzo da parte dell'uomo di strumenti tecnologici sempre più potenti e sofisticati*”. Il ruolo degli insegnanti è essenziale a sviluppare “*uno spirito critico che può rappresentare un antidoto, sebbene parziale, allo sviluppo incontrollato degli strumenti tecnici e del loro utilizzo in un senso totalizzante e, in quanto tale, rischioso*”. La filosofia è il luogo primario del pensiero critico, ed essa è al cuore di questo libro. Ma all'interno della scienza stessa, va sottolineato il ruolo dei “risultati negativi”, che ponendo dei limiti, dicendo no a progetti ambiziosi, talvolta anche rigorosi, hanno, da una parte consolidato ambiti scientifici, dall'altra aperto vie nuove al sapere⁴⁷. Essi sono possibili quando si esplicitano principi di conoscenza e si fa un passo di lato, critico, fino, appunto, a dare con rigore i limiti di un programma scientifico. Si pensi alla prova, semplice e splendida, della irrazionalità della diagonale del quadrato: un veder simmetrie ed un ragionamento logico, per assurdo. Demolisce il progetto di Pitagora del governo e la misura del mondo con numeri interi e loro rapporti: la diagonale non è un rapporto fra interi, è un a-logos, un numero “irrazionale”. Un dramma per il Logos pitagorico e, ad un tempo, nuove aperture⁴⁸, fra cui la geometria di Euclide: linee senza spessore, senza numero, simmetrie del piano.... Poincaré chiama “risultato negativo” il suo Teorema dei Tre Corpi che falsifica la visione di Laplace, per il quale la determinazione avrebbe dovuto implicare la previsibilità, come in tutti i sistemi digitali del resto (si ricordi la lucidità di Turing, che sa quel che dice, e Pearl, che invece ci crede ancora). Ed inizia con Poincaré, si diceva, la geometria dei sistemi dinamici, branca attualissima delle fisica matematica. I due teoremi di incompletezza di Gödel sono un'altra perla “critica”, dei “no” imponenti al programma scienziato di Hilbert, del 1900 e 1920: dati gli assiomi di una qualsiasi teoria matematica, diceva Hilbert, possiamo dimostrare la coerenza e dedurre tutti i teoremi validi in modo “potenzialmente meccanizzabile” (sic)⁴⁹ – falso prova Gödel, 1931 (e con lui Church, 1932, e Turing, 1936). Si ritrova questa stessa hybris nella ipotesi di poter descrivere tutta la cognizione umana in IA, implementata in sequenze di 0 ed 1, od anche superare l'intelligenza umana. Identica ipotesi di completezza è presente nell'idea che “ogni fenotipo è descritto nel DNA”: per il Dogma Centrale della biologia molecolare, l'informazione ereditaria è scritta tutta e solo nel DNA, la cui analisi permetterebbe di dedurre e capire ontogenesi e filogenesi, come, per Hilbert, era deduttivamente completa la sequenza finita di simboli degli assiomi di una teoria matematica. E' sorprendente e doloroso per un matematico come me, che ha lavorato al ruolo costruttivo dei risultati di “non calcolabilità”, di incompletezza⁵⁰... ritrovare ancor oggi ipotesi di completezza ed

thought. *Philosophy World Democracy*, November.

47 Parlo a lungo dei limiti e delle aperture generati dai risultati negativi (limitativi) in Longo G. (2023), *Le cauchemar de Prométhée. Les sciences et leurs limites*, Paris, PUF.

48 Chiurazzi G. (2018) *Dynamis. Ontologia dell'incommensurabile*. Guerini, Milano.

49 In pieno nelle “la Cariddi del nominalismo”, per sfuggire alla “Scilla dell'ontologismo”, Enriques F. (1935), *Philosophie scientifique et empirisme logique (citato)*.

50 Si vedano i teoremi recenti di incompletezza “concreta”, ispirati dai teoremi di Gödel, ma basati su enunciati formalmente indimostrabili, matematicamente più significativi: Longo, G. (2011). *Reflections on Concrete Incompleteness. Philosophia Mathematica*, 19(3), 255-280. Essi permettono anche di capire dove, nella prova, si deve fare necessariamente uso di “giudizi geometrici”, di “diagrammi infinitari”... dimostrabilmente non formalizzabili – cenni in *Matematica e senso* (citato).

ancora una volta su sequenze di lettere o numeri. E' di gran conforto scoprire che un immenso matematico, forse il più originale del secondo dopoguerra, Alexander Grothendieck, poco prima di allontanarsi dall'impegno accademico, nel 1971, legge in modo critico il libro di Monod, appena pubblicato e già celeberrimo, *Il caso e la necessità*. Il libro, forse il miglior fondamento teorico del geno-centrismo, è basato sul Dogma Centrale e sulla visione della cellula come "meccanismo cartesiano", "computer digitale", a cui si aggiunge del "rumore", il caso. Grothendieck scrive che è *scienziista*⁵¹. Che lucidità capirlo nel 1971!

Gli autori di questo libro si battono, con svariati strumenti filosofici, per un "*ribaltamento del mito di Prometeo*"; quel mito divenuto un "incubo" nel titolo del libro in nota, per cui, continuano, "*ci auto-trasformiamo per amore delle nostre macchine, perché prendiamo le nostre macchine a modello delle nostre alterazioni: rinunciando quindi ad assumerci noi stessi come unità di misura e con ciò limitiamo la nostra libertà o vi rinunciando*". Per uscire da quella che "*Anders definisce vergogna prometeica*", la filosofia e la scienza devono dialogare intensamente. E' bene che chi fa scienza o l'insegna, colga da una parte il senso del suo lavoro anche grazie ad una critica filosofica, come quella sviluppata con grande ampiezza in questo libro – i riferimenti, in particolare, al lavoro di Heidegger, Habermas ed Anders sono estesi e molto ben motivati, colgono le sfumature filosofiche, sanno estrarre il meglio dal lavoro di questi filosofi. D'altra parte, la filosofia deve sussumere nel suo quadro critico anche le caratteristiche della scienza come "substantiated, collective, critical enquire"⁵², con le sue tecniche, certo, ma sempre da distinguere dalla tecnoscienza. La visione scienziista della conoscenza, basata solo sull'accumularsi di tecniche, dal "problem solving" al "techno-fix", è incompatibile con i risultati negativi, limitativi, che la scienza sa anche proporre; per di più, si diceva, questi hanno sempre aperto verso nuovi punti di vista. Anche in IA, grazie alla relativa solidità ed al rigore di alcuni metodi matematici nel continuo, in particolare quelli di gran lunga più usati, la ricerca di percorsi o valori "ottimali", di geodetiche in immensi spazi di fasi⁵³, si comincia a vedere qualche risultato limitativo. Di recente, è stato dimostrato che l'esistenza di tali ottimi, necessaria per trovare soluzioni al problema trattato, è equivalente all'Ipotesi del Continuo in Teoria degli Insiemi⁵⁴. Tale Ipotesi è indecidibile; di conseguenza, non può esistere un metodo "uniforme ed effettivo" per trovare detti ottimi. Ovvero, e questo è anche nella realtà dei fatti, di fronte ad ogni problema, ci vorrà del lavoro umano per costruire matematiche ed ambienti di programmazione che sappiano affrontarlo. Un minimo cambiamento (il passaggio da 19 caselle a 17 nel gioco del Go) e... la macchina si blocca. Ogni volta, tecnici di talento devono costruire una macchina ad hoc, che può anche far benissimo, essere utilissima. L'IA è tutto fuor che "plastica", la grande proprietà del cervello animale, che lo rende "generalista". Quest'ultimo non solo impara ad andare a caccia, a cercar funghi, a giocare con il figlio del padrone... ma soprattutto modifica le proprie strutture interne. La struttura matematica a strati del Deep Learning somiglia vagamente alla stratificazione della corteccia visiva. Ma l'udito, l'odorato, il tatto..., per il poco che se ne sa, funzionano grazie a strutture di connettività cerebrali profondamente diverse. Tuttavia, in caso di deficit cognitivo, una può rimpiazzare l'altra, modificandosi strutturalmente per svolgere la nuova funzione⁵⁵.

Queste osservazioni, al di fuori dei miti, possono aiutare anche a far meglio le macchine, di cui, come umani, abbiamo bisogno: per "*Heidegger*, si ricorda nel libro, *la tecnica è codeterminante*

51 Grothendieck A. (1971) La nouvelle Eglise universelle, *Survivre... et vivre* n°9 AoûtSeptembre.

52 Si veda il dibattito "Science in the storm" in *Philosophy World Democracy*, <https://www.philosophy-world-democracy.org/articles-1/science-in-the-storm>, August 2021.

53 Le Cun Y. (2023) *Quand la machine apprend...* Citato.

54 Ben-David S., Hrubeš P., Moran S., Shpilka A. and Yehudayoff A. (2019). Learnability can be undecidable. *Nature, Machine Intelligence*, January, vol 1, 44-48.

55 Si veda Berthoz A. (2013). *La vicariance*. Odile-Jacob, Paris, ricco di osservazioni neuro-fisiologiche sulla vicarianza cerebrale nell'uomo. E così, il « pesce delle grotte », molte specie prossime che han perso gli occhi nel corso dell'evoluzione adattandosi al buio, usa, si pensa, parti del cervello visivo per migliorare la sensibilità alle vibrazioni dell'acqua (una sorta di radar). I loro ibridi tuttavia, hanno gli occhi: il DNA usato per produrli è lì, ma non è più espresso, vedi Gatenby, R.A. (2017) Is the Genetic Paradigm of Cancer Complete? *Radiology*, 284:1-3.

del conoscere”. E dell’essere al mondo: la nostra umanità è anche tecnica, dai tempi dell’invenzione della pietra lavorata per uno scopo. Ma appena si arriva a proporre un quadro teorico anche solo parziale, la scienza sa capirne i limiti e, se possibile, individuare altre vie. Malgrado l’hybris tecnoscientifica, le promesse iterate da 60 anni di far meglio del cervello umano in tutto, la “singolarità o superamento”, attesi ogni volta entro 5-10 anni⁵⁶, il quadro matematico in IA è oggi rilevante. Così, permette, oltre tecniche notevolissime, anche qualche risultato limitativo, si diceva. Invece, come sostiene Feynman, non è possibile dimostrare falsa una teoria vaga. Questo è il caso per la “teoria del programma genetico”, da Monod a Doudna (citati), con il suo fantomatico “editing esatto” del DNA, grazie alla tecnica CRISPRCas9⁵⁷. Tuttavia, fra i libri più importanti dei due autori, va sottolineata una differenza. Il libro di Monod del 1970 è di certo scienziato, ma racconta grandi osservazioni e uno straordinario lavoro di laboratorio – in un quadro teorico errato. Può succedere: è successo anche a Ibn Yunus (Egitto, X secolo), grande astronomo e matematico, co-inventore della trigonometria sferica e osservatore finissimo del cielo, in... un quadro teorico Tolemaico, geo-centrico⁵⁸. Il libro del 2017 di J. Doudna, premio Nobel nel 2020 con E. Charpentier, pure geno-centrico, accanto alcuni cenni alla innovante tecnica di laboratorio realizzata per modificare il DNA (CRISPRCas9), è dedicato al 50% a far promesse⁵⁹: terapie genetiche d’ogni sorta, OGM che resistono a qualsivoglia aggressione... L’autrice sembra soprattutto tener d’occhio il valore azionario delle numerose start-up in cui è implicata.

Ma è così importante un pensiero teorico e critico? Come dice Boltzmann, “non c’è nulla di più pratico, in scienza, di una buona teoria”. Con il principio di inerzia, Galileo demolisce definitivamente il quadro Tolemaico (i “movimenti retrogradi” degli epicicli planetari divengono impossibili) ed apre la via a Newton. La Teoria dell’Evoluzione ha permesso di far buon uso del sequenziamento del DNA, che ha contribuito ad individuare correlazioni evolutive di grande interesse – il DNA, per noi, è una traccia chimico-fisica di tutta l’evoluzione, di straordinaria importanza, un “vincolo” (constraint) alle dinamiche molecolari, ampiamente stocastiche, canalizzate dalla cellula, in interazione con l’organismo, nella sua storia evolutiva, in un ecosistema⁶⁰. I principi, espliciti e rigorosi, da Galileo (inerzia) ad Heisenberg (indeterminazione), od a Darwin, di cui il primo principio, “riproduzione con variazione” (e motilità), è al cuore della produzione di diversità biologica⁶¹, permettono la costruzione teorica e quel passo di lato, critico, ponte fondamentale con la filosofia, ed aiutano eventualmente a cambiar strada, ad inventar del nuovo, come è successo dopo i risultati negativi dei pitagorici, di Poincaré, di Gödel⁶².... Questo è

56 H. Simon, nel 1965, M. Minsky nel 1975... Si veda anche il dibattito con Stéphane Mallat, ottimo matematico dell’IA, e chi scrive al Collège de France, 2019: per Mallat “non c’è limite a quel che possiamo fare in IA” (<https://www.college-de-france.fr/fr/agenda/colloque/le-travail-au-xxie-siecle-droit-techniques-ecoumene>)

57 Tecnica potentissima e 10 anni di osservazioni di effetti indesiderati: Papathanasiou, S, et al. (2021) Whole chromosome loss and genomic instability in mouse embryos after CRISPR-Cas9 genome editing, *Nature Communications*, v. 12, art. 5855; Park, S. H., Cao, M., Bao, G. (2023) Detection and quantification of unintended large on-target gene modifications due to CRISPR/Cas9 editing. *Current Opinion in Biomedical Engineering*, 100478.

58 Longo, G., Mossio, M. (2020) Geocentrism vs genocentrism: ... citato.

59 Doudna J., Sternberg S. (2017) *A crack in Creation: Gene Editing and the Unthinkable Power to Control Evolution*, ... Longo G. (2021). Programming Evolution: a Crack in Science... citati (nel secondo, si accenna al rilievo del lavoro di Ibn Yunus, che avrebbe di certo meritato un Premio Nobel). Si veda anche Longo G. (2023) Les nouveaux Organismes génétiquement modifiés (OGM) : pour un “principe de précaution scientifique”. *Philosophy World Democracy*, 1 septembre (in italiano: *Naturalmente Scienza*, 2024, anno5n.1 <https://www.naturalmentescienza.it/>).

60 Elowitz, M. B., Levine, A. J., Siggia, E. D., & Swain, P. S. (2002). Stochastic Gene Expression in a Single Cell. *Science*, 297 (5584), 1183-1186; Montévil, M., Mossio, M. (2020) The Identity of Organisms in Scientific Practice: Integrating Historical and Relational Conceptions. *Front. Physiol.* 11:611.

61 E del nostro tentativo teorico in biologia dell’organismo: Soto A., Longo G. (guest eds.) (2016)... (citato).

62 Per dimostrare l’esistenza di asserti non dimostrabili, di funzioni non calcolabili, Gödel, Church e Turing, fra il 1931 ed il 1936, danno diverse nozioni di algoritmo, poi dimostrate equivalenti, e, quindi, di funzione calcolabile, che saranno al cuore della macchina numerica-algoritmica che sta cambiando il mondo. E lo cambia in meglio, se

impossibile in una biologia dell'organismo, fintanto che il suo quadro "teorico" è dominato da vaghe metafore digitali ed alfabetiche (quali l'"editing" del DNA, come fosse un testo scritto – contro la stessa pratica in laboratorio, che è stocastica) ed in cui il rapporto fra risultati ed investimenti (e promesse), dalla salute umana agli OGM, è bassissimo (v. note e riferimenti sul GWA e sui nuovi OGM). Ma la cascata dei fallimenti, dopo le promesse di far sparire la fame nel mondo con gli OGM (2000⁶³) ed il cancro (von Eschenbach (2003), citato), e l'evidenza empirica non bastano. Come si osserva nel libro, in riferimento a Lakatos: *"la falsificazione non può essere il risultato immediato di una procedura sperimentale. A suo avviso, nessun asserto di base può da solo indurre uno scienziato al rigetto di una teoria: "la natura può gridare il suo NO, ma l'ingegnosità umana può sempre gridare più forte; con sufficiente ingegnosità e un po' di fortuna qualsiasi teoria può essere difesa 'in modo progressivo' per lungo tempo anche se è falsa"*". Questo è particolarmente vero quando gli interessi finanziari sono nettamente superiori al contenuto teorico; come dice una coraggiosa collega biologa, "the geno-centric enterprise is "too big to fail"⁶⁴".

Sia chiaro che lo sguardo critico, che abbiamo sviluppato brevemente su due tecnoscienze di grande potenza e che dominano oggi, è inteso contribuire a svilupparle meglio: il computer digitale e le sue reti, come le analisi molecolari, del DNA in particolare, e del loro ruolo nelle dinamiche dell'organismo, sono di grandissima importanza. Ma vanno immersi in una riflessione critica, di tipo sia scientifico, come in alcuni riferimenti qui proposti, sia filosofico, come fa con grande ampiezza questo libro. In alcune applicazioni attuali di incontro fra IA e biologia molecolare, si può osservare una presa di coscienza del rilievo della proposta teorica, in quanto esplicitazione critica di principi. Un esempio è dato da alcune applicazioni recenti del Deep Learning alla biologia molecolare: si comincia a capire che i "dati non sono già lì", ma che è la teoria che fissa gli osservabili e la misura, come diceva Einstein, quindi la produzione di dati; che ipotesi teoriche implicite possono portare a conseguenze errate di analisi computazionali; che il trattamento statistico è al cuore dell'analisi delle interazioni macro-molecolari (lontano dai "meccanismi cartesiani" di Monod e l'editing esatto di Doudna); che questo trattamento è fortemente "dipendente dal contesto" (organismo, ecosistema) e dallo sguardo del soggetto conoscente; che il Deep o, più in generale, il Machine Learning (ML) fornisce una sorta di potente "microscopio computazionale", utilissimo, ma ricco di bias. Alcuni pionieri passano così da un lavoro "ML-driven" ad uno "ML-assisted", nel quadro di proposte teoriche esplorative del ruolo del Machine Learning nella ricerca scientifica⁶⁵. In modo analogo, per far ricerca assistiti da macchine,

si sviluppa un pensiero più critico e meno hybris, se non la si proietta sul mondo, dicendo che cervello e cellula, il mondo, sono istanze di quella macchina alfa-numerica, Longo G. (2023) *Le cauchemar de Prométhée...* (citato) e Lassègue J., Longo G. (2025) *Critique de la raison numérique ; des mythes de l'Intelligence Artificielle à la révolution silencieuse de l'écriture*, di prossima pubblicazione.

63 Fra le tante situazioni di grave crisi: Kranthi KR, Stone GD (2020) Long-term impacts of Bt cotton in India, *Nature Plants*, Mar 6(3):188-196 (dibattito in: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32170289/>). Per altre conseguenze e l'attuale discussione in Europa sui nuovi OGM (New Genetic Technologies, CRISPRCas9): <https://ensser.org/>.

64 Con una crescita della produttività inferiore a quella europea, la vendita di pesticidi in Canada ed Argentina, dove gli OGM sono oltre l'80% dei principali prodotti coltivati, è aumentata del 244% e del 400% in 20 anni, <http://gmoinquiry.ca/environment/>; <https://www.dw.com/en/pesticide-atlas-2022/a-60390427>; analoga situazione negli USA: Heinemann J. et al. (2014) Sustainability and innovation in staple crop production in the US Midwest, *International Journal of Agricultural Sustainability*, 12:1&4, 71–88&387-390. Per le conseguenze ambientali di questo immenso business: Antoniou, M., Robinson, C., Castro, I., Hilbeck, A. (2023) Agricultural GMOs and their associated pesticides: misinformation, science, and evidence, *Environ Sci Eur* 35, 76. Conosco il coraggio di questi colleghi ben sapendo l'immensa difficoltà a trovar posti e finanziamenti, ormai solo possibili nel tanto elogiato "partenariato pubblico-privato", deleterio per il pensiero critico, per una ricerca disinteressata. Inoltre, chi osa documentare le critiche è spesso diffamato ed aggredito da potentissime lobbies economico-finanziarie, Witze, A. (2023) The fight to end bullying in academia, *Nature*, November.

65 Bravi B. (2025) Machine Learning in Molecular Life Sciences: Calibrating New Tools for Prediction, Observation, and Discovery through Statistical Knowledge Building, in *Mathematical tools in the life sciences*:

l'esperienza in astrofisica, uno degli ambiti scientifici di maggior spessore teorico, da Galileo a Newton ad Einstein, guida nell'invenzione di metodi di analisi digitali di immagini e dati, forniti in quantità immense dall'astronomia attuale, applicabili anche a diversi ambiti tecnici⁶⁶. Contro ogni riduzionismo scienziato, alcune reti di interazioni macromolecolari, che hanno probabilità 0 di formarsi e di durare se analizzate in termini meramente fisico-chimici, sono studiate oggi come il risultato di una dinamica darwiniana della cellula-organismo in un ecosistema: è cioè una teoria dello stato vivente della materia che fa capire la struttura chimico-fisica o vanno capite l'una con l'altra⁶⁷.

La matematica gioca un ruolo cruciale perché è continuamente utilizzata ed invocata nelle tecnologie attuali, sia in modo puntuale sia metaforico. Inoltre, insieme alla fisica, ha saputo proporre limiti e, quindi, nuove invenzioni teoriche. Quanto alla sua didattica, va insegnato come una parte importante del lavoro di chi fa ricerca consiste nell'affrontar problemi cambiando il punto di vista, provando a formularli in modo diverso, di trasportarli da un contesto a un altro. La scienza non è tanto "problem solving", come pretende la tecnoscienza, ma piuttosto "theory building": il cambiar punto di vista, richiede una critica e una costruzione teorica ed è anche un modo per risolvere i problemi, immergendoli, se utile, in un mare di nuovi concetti e strutture, come ha fatto Grothendieck, con idee matematiche originali e generalissime, o Wiles, per risolvere il problema di Fermat. Ma questo è vero anche per una questione minore, anche per fare un esercizio a scuola, imparando a guardarlo con "i propri occhi" o da un altro punto di vista, non (solo) applicando una tecnica. Kuhn, spesso citato nel libro, osserva che la ricerca è veder cose nuove in vecchi dati, dar loro un nuovo senso. Copernico aveva al più i dati di Ibn Yunus sul sistema planetario, ma osò prendere un punto di vista diverso, il punto di vista del Sole. Era ispirato, secondo van Fraassen⁶⁸, dalla prospettiva pittorica italiana, che permetteva al pittore, fissando il punto limite all'orizzonte, di proporre allo spettatore un "punto di vista"⁶⁹. Il pensiero umano, e di certo anche animale, è un "immaginare configurazioni di senso", come osavo dire parlando dell'interpolare le stelle, un gesto forse solo umano, per dar loro un senso, inventando costellazioni, figure, simboli del mito. Figure probabilmente utili all'orientamento notturno, all'agricoltura stagionale, di certo un primo modo simbolico di stare insieme nel mondo, un gesto astrattissimo, eminentemente matematico⁷⁰.

describing, explaining, understanding, and operating, J. Escobar and D. Sarikaya eds., Springer (to appear).

L'esigenza di scientificità è sottolineata anche in Coveney P., Highfield R. (2024) Artificial Intelligence Must Be Made More Scientific, *Journal of Chemical Information and Modeling*, July 27, dove, fra l'altro, si riconosce che raramente si discute delle difficoltà d'approssimare dinamiche continue con il discreto computazionale (v. nota sullo "shadowing" ed i riferimenti nell'articolo di Coveney e Highfield).

66 Brescia M., Longo G. (U. Napoli) (2021) Astroinformatics, data mining and the future of astronomical research, *Nuclear Physics B*; Dosi A. et al. (2024) AMBER - Advanced SegFormer for Multi-Band Image Segmentation: an application to Hyperspectral Imaging, *to appear*.

67 Sharma A. et al., (2023) Assembly theory explains and quantifies selection and evolution, *Nature*, Vol 622, October 12, 321; in breve, per capire gran parte della fisico-chimica del vivente, questa va immersa in una buona teorizzazione biologica, ovvero, per dirlo in modo provocatorio, la prima va "naturalizzata", Longo G. (2020) Naturalizing Physics. Or, embedding physics in the historicity and materiality of the living. In *Deleuziana*, n. 11, special issue on "Differential Heterogenesis" (Sarti et al. eds), April.

68 van Fraassen B. (1970) *An introduction to the Philosophy of Space and Time*, Random House, New York.

69 Il punto limite, prospettico, posto molto in basso, ad esempio, fa sentire lo spettatore inginocchiato, come di fronte alcuni San Sebastiano e Crocifissioni di Piero, v. Longo, G., Longo, S. (2020). Infinity of God and Space of Men in Painting, ... citato. In *Matematica e senso* (citato) ricordo che H. Simon (molto premiato in IA ed economia) sostiene che una macchina avrebbe potuto derivare le orbite kepleriane dai dati di Tycho Brahe e spiego l'errore matematico che s'aggiunge alla insensibilità storico-filosofica.

70 Per una bellissima e rigorosa ricostruzione storico-filosofica del ruolo del "gesto", come lo abbiamo qui inteso, nella matematica e fisica moderna, si veda Châtelet G. (2012) *Le poste in gioco del mobile*, trad. it. di A. Cavazzini, Mimesis (Paris, Seuil, 1993). L'antologia commentata, Cabassa L., Pisano F. (2024) *Epistemologie. Critiche e punti di fuga nel dibattito contemporaneo*, Mimesis, offre un panorama pluralista, approfondito ed ampio del pensiero critico contemporaneo.