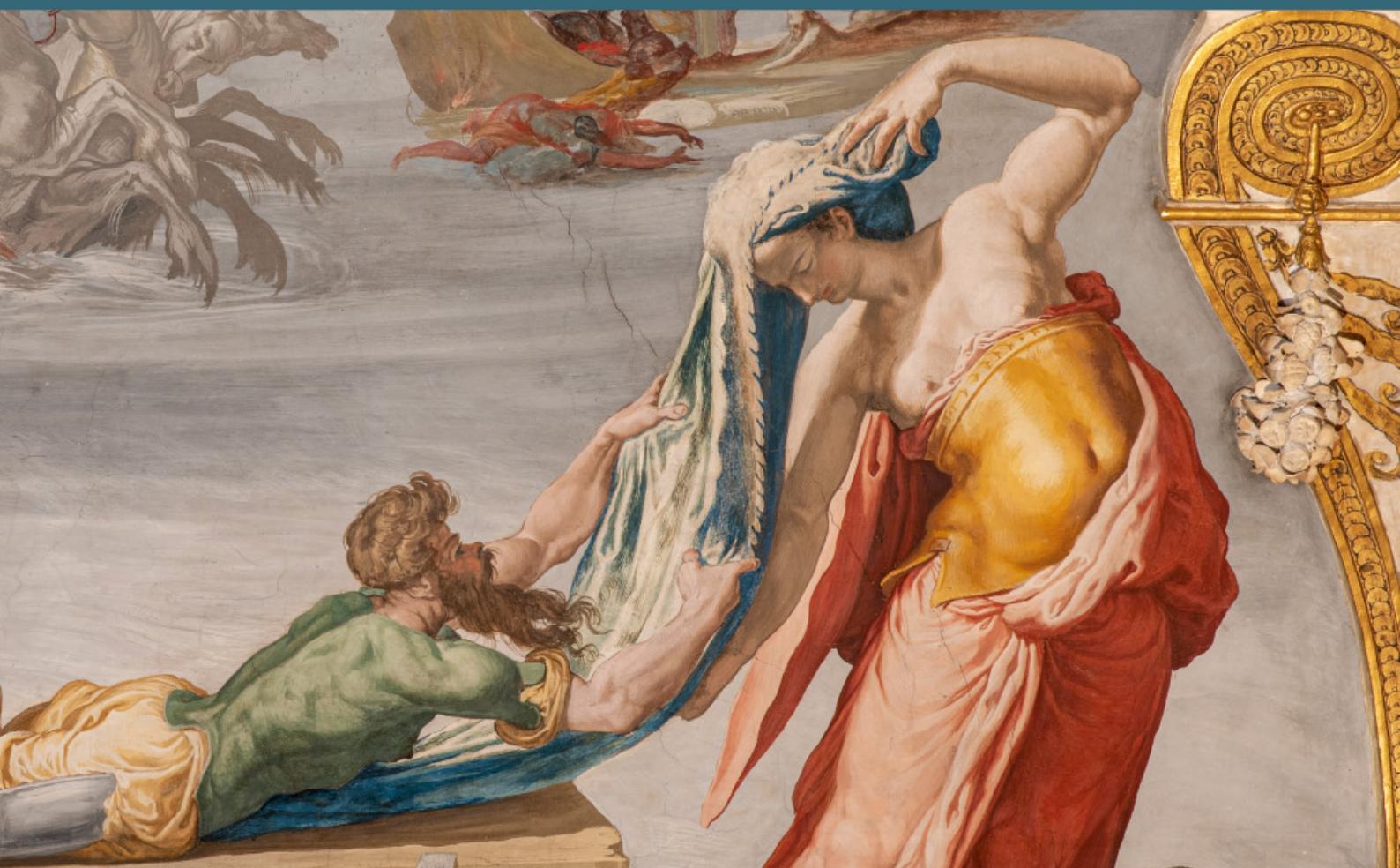


ANNALES

PROCEEDINGS OF THE ACADEMY OF SCIENCES OF BOLOGNA

CLASS OF PHYSICAL SCIENCES



ANNALES

PROCEEDINGS OF THE ACADEMY OF SCIENCES OF BOLOGNA
CLASS OF PHYSICAL SCIENCES

3



Board of Governors of the Academy of Sciences of Bologna

President: Prof. Luigi Bolondi

Vice-President: Prof.ssa Paola Monari

Secretary of the Class of Physical Sciences: Prof. Lucio Cocco

Vice-Secretary of the Class of Physical Sciences: Prof. Aldo Roda

Secretary of the Class of Moral Sciences: Prof. Giuseppe Sassatelli

Vice-Secretary of the Class of Moral Sciences: Prof. Riccardo Caporali

Treasurer: Prof. Pierluigi Contucci

Annales. Proceedings of the Academy of Sciences of Bologna

Class of Physical Sciences

Editor in Chief

Pierluigi Contucci

Editorial Board

Daniele Bonacorsi (Physics)

Luca Ciotti (Astronomy)

Giacomo De Palma (Mathematics)

Matteo Guidotti (Chemistry)

Pier Luigi Martelli (Biology)

Alberto Parmeggiani (Mathematics)

Susi Pelotti (Medicine)

Nicola Rizzo (Medicine)

Marco Roccetti (Computer science)

Cesare Saccani (Engineering)

Editorial Consultant of the Academy of Sciences of Bologna

Angela Oleandri

Fondazione Bologna University Press

Via Saragozza 10, 40123 Bologna

tel. (+39) 051 232 882

ISSN: 2975-2302

ISBN: 979-12-5477-702-2

ISBN online: 979-12-5477-703-9

DOI: 10.30682/annalesps2503

www.buponline.com

info@buponline.com

Copyright © the Authors 2025

The articles are licensed under a Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0

Cover: Pellegrino Tibaldi, *Odysseus and Ino-Leocothea*, 1550-1551,
detail (Bologna, Academy of Sciences)

Layout: Gianluca Bollina-DoppioClickArt (Bologna)

First edition: December 2025

Table of contents

Prefazione, Luigi Bolondi	1
Introduzione/Introduction, Pierluigi Contucci	5
L'arte della memoria e il metodo scientifico <i>Giovanni Jona-Lasinio</i>	9
Il tempo geologico, il Diluvio, Leonardo, Stenone <i>Gian Battista Vai</i>	19
Il volo cieco dei pipistrelli. 1793, Lazzaro Spallanzani e la ricerca sui chiroteri, mammiferi volanti <i>Stefano Meloni</i>	43
Alle radici dell'ecografia (1880-1949): la “magia” del quarzo per le applicazioni belliche e civili <i>Angelo Vedovelli</i>	53
L'ingegneria mineraria nelle Università italiane: dall'epoca moderna alla società contemporanea <i>Paolo Macini, Ezio Mesini</i>	73
Gian Domenico Cassini: la misura del “mondo” <i>Bruno Marano</i>	91
Identificare le fasi prodromiche della demenza attraverso l'analisi computazionale del linguaggio: quindici anni di ricerche sull'italiano <i>Gloria Gagliardi, Fabio Tamburini</i>	97
La difficile sfida contro le frane: riflessioni dopo maggio 2023 <i>Matteo Berti</i>	113

**Gli atomi, il numero di Avogadro e il moto browniano:
da Democrito ad Einstein e Perrin**

Angelo Vulpiani

127

The fear of AI: A simple story of complexity

Marco Roccati

137

La comunicazione, ponte tra intelligenza naturale e intelligenza artificiale

Silvano Tagliagambe

149

Prefazione

*E fieramente mi si stringe il core,
A pensar come tutto al mondo passa,
E quasi orma non lascia.*

Care Accademiche e cari Accademici,
Care lettrici e cari lettori,

Giunto al termine del mio mandato, approfitto delle pagine degli *Annales* per trasmettervi il mio più caloroso saluto, e anche per tentare di lasciare una piccola traccia del mio breve, ma per me intenso, passaggio in Accademia.

Nel custodire una traccia del nostro pensiero e del nostro agire si compendia infatti il significato ultimo degli *Annales*, giunti ormai al terzo anno di pubblicazione, rinnovando finalmente l'antica tradizione dell'Accademia delle Scienze dell'Istituto di Bologna.

Lasciare una traccia o una piccola orma: non è forse questa una delle aspirazioni, neppure tanto recondite, dell'animo umano? Le parole struggenti de *La sera del dì di festa*, pur nel loro pessimismo, lasciano uno spiraglio di speranza. È profondamente umano l'attaccamento a quel "quasi" e la fiducia che qualcosa di noi possa rimanere. In particolare, nel cuore e nella mente di chi ci ha conosciuto, ma, forse, anche in qualcosa che abbiamo fatto. «Il Viver si misura dall'opre e non dai giorni», diceva Metastasio.

Il ripensamento delle vecchie *Memorie* e dei *Rendiconti* dell'Accademia è scaturito proprio dal desiderio che tanti contributi ascoltati in Sala Ulisse, autorevoli e densi di spunti e significati, non si volatilizzassero nello spazio di un pomeriggio, ma rimanessero custoditi a memoria futura nello scrigno della nostra biblioteca, oltre che nei files dei vostri computer e del sito dell'Accademia, a disposizione di qualche intellettuale curioso che un giorno, chissà, vorrà rivedere che cosa si pensava e si faceva in questi anni in Accademia, forse anche per trarre qualche ispirazione.

Appunto: che cosa si è fatto in Accademia in questi tre anni? Tutto è passato così intensamente e così rapidamente che anche per me è difficile ricordare e ricapitolare.

Il programma culturale

I pomeriggi in Sala Ulisse e in Sala Manfredi sono stati il cuore pulsante della nostra attività. Dal 2023 al 2025 oltre 200 eventi complessivi con una infinità di letture singole, seminari e

cicli di incontri atti a soddisfare tutte le esigenze culturali. Con una partecipazione in presenza e online che assomma a parecchie migliaia, a cui si aggiungono le decine di migliaia di visualizzazioni (68.000 nel solo anno 2024) sul nostro sito e nel canale YouTube, dove nello stesso anno sono stati ben pubblicati 78 video.

Ricordo solo alcuni dei cicli di questo ultimo anno accademico 2025, inaugurato con le letture magistrali di Svante Pääbo, premio Nobel per la Medicina 2022 e ora nostro socio onorario, e di Nadia Fusini, scrittrice, anglista e traduttrice.

Eccoli: *Intelligenza artificiale: verso una nuova sintesi tra scienza e umanesimo*, *Serendipity nelle scienze fisiche e nelle scienze morali*, *Letteratura e Scienza*, *Cucina e politica*, *Matematica e Scienza*, *Sfide della democrazia contemporanea*, *Questioni di genere*, *L'Accademia incontra la scuola*, *Il Mercato europeo*, *Arte, Storia e Umanesimo*, *Libri che parlano*, *Accademia punti di vista*, *Esplora i fondamenti dell'Universo*, *Sulle spalle dei giganti*, la Masterclass internazionale *Esplora i fondamenti dell'Universo*, *Il percorso scientifico di Cassini*, solo per citarne alcuni.

L'evento dell'anno è stato comunque l'incontro internazionale delle Accademie europee *The actual role of Academies in a changing world*, che ha avuto il riconoscimento della medaglia del Presidente della Repubblica e nel quale si sono definite quelle che dovrebbero essere le linee operative comuni delle Accademie europee.

Vorrei però soffermarmi ancora su un ciclo in particolare, che quest'anno giunge alla terza edizione: quello dei *Top Ten, nelle Scienze fisiche e nelle Scienze morali*. Con questo format innovativo si è cercato di dare ai giovani studiosi, certamente la forza trainante della ricerca scientifica del nostro Ateneo, uno spazio che in Accademia non hanno mai, o solo raramente hanno avuto. L'impostazione degli incontri è improntata al superamento dell'autoreferenzialità che spesso affligge il corpo accademico. Ogni studioso deve infatti parlare solo delle ricerche importanti svolte da altri, scegliendo dal meglio (“Top ten”) di quanto è stato pubblicato negli ultimi anni. Sono dei veri e propri incontri interdisciplinari dove i migliori giovani studiosi hanno ricevuto e riceveranno il meritato premio dell'Accademia conferito dalla Fondazione Maria Teresa e Alessandro Ghigi. La formula ha avuto successo ed è stata apprezzata anche da altre Accademie; la Sala Ulisse è stata finalmente animata da una popolazione giovanile, dalla quale si spera di trarre nuova linfa per le iniziative future dell'Accademia.

Attività editoriale

Non meno rilevante è stata l'attività editoriale di questo triennio. Oltre ai volumi degli *Annales* delle Scienze fisiche e delle Scienze morali, nei quali sono riportati alcuni dei contributi più significativi del programma culturale, è stata completata la collana *Mens Agitat - Colloquia*, storia scientifica dell'Università di Bologna, con la pubblicazione dei volumi *Lo sviluppo nel dopoguerra dell'Ingegneria all'Università di Bologna: maestri e futuro*, *Le Scienze umanistiche a Bologna tra il secondo dopoguerra e il XXI secolo*, *La matematica a Bologna dal dopoguerra*, *La vocazione di formare giuristi*, *Le cliniche universitarie a Bologna dalla seconda metà del Novecento all'inizio del nuovo secolo*. Entro l'anno saranno pubblicati i volumi relativi a Medicina veterinaria e Medicina preclinica. Tutti i volumi della collana sono stati digitalizzati e resi disponibili online gratuitamente.

È stata inoltre completata la pubblicazione degli ultimi volumi della *Lectura Dantis Bononiensis*. Si tratta della raccolta delle *lecturae* pubblicate nell'omonima collana in tre volumi di pregio destinati, rispettivamente, all'*Inferno*, al *Purgatorio* e al *Paradiso*. Ciascun volume è completato da un corposo indice dei nomi che lo rende maggiormente fruibile.

Biblioteca e Archivio storico

Con il contributo insostituibile della nostra Segreteria e del personale all'uopo reclutato, con un progetto dedicato, nel 2025 è stato completato (progetto avviato nel 2021 dal Prof. Walter Tega) la realizzazione della *Biblioteca delle Accademie*, unica nel suo genere, la quale comprende la raccolta completa degli atti della nostra Accademia dal 1730 a oggi (*Memorie, Rendiconti, Annales*), accanto a quelli che continuano a pervenirci, nonostante il nostro lungo silenzio, dalle più importanti accademie italiane e straniere come la Royal Society di Londra, quella di Edimburgo, l'*Académie des Sciences* di Parigi, L'Accademia Reale svedese delle Scienze, L'Accademia Russa delle Scienze e l'Accademia Cesarea Leopoldina.

Sono stati riordinati e inventariati digitalmente i volumi, confusamente accumulati per anni negli armadi, su ognuno di essi è stato apposto timbro e collocazione e predisposte due copie. Questo ci permette finalmente di avere una Biblioteca consultabile e facilmente fruibile.

Nel 2024 è iniziato il riordino dei locali dell'Archivio con lo sgombero di materiali non pertinenti. Seguirà un lavoro di riordino dei faldoni d'Archivio.

Nell'ambito di ciò che è stato fatto non posso non citare il fondamentale e approfondito lavoro di analisi per una possibile riforma dello Statuto. Non ho nessun merito per questo obiettivo, se non quello di averlo seguito e sollecitato garantendone la correttezza di svolgimento. L'istanza di revisione dello Statuto ha radici lontane e mi è stata trasmessa dal precedente governo dell'Accademia. Alle ipotesi di revisione inizialmente scaturite da questo lavoro hanno fatto seguito numerosi suggerimenti e valutazioni che hanno fatto emergere la complessità e la delicatezza della revisione dello Statuto di una antica Accademia come la nostra, che deve mantenere, pur nel rinnovamento, le caratteristiche fondanti che rientrano in quelle definite dall'art. 33 della Costituzione. Ciò ha indotto il Consiglio Direttivo, su indicazione delle rispettive Assemblee di classe, a nominare una apposita "commissione Statuto", nella quale fossero presenti anche giuristi competenti a fornire gli elementi per una corretta impostazione della revisione nei punti in cui si ritenesse necessario e indispensabile apportare modifiche. L'approfondito lavoro della commissione, che ho molto apprezzato e che ringrazio sentitamente, non ha tuttavia trovato il consenso di tutti i membri del Consiglio Direttivo e pertanto ho ritenuto necessario un ulteriore periodo di riflessione che proseguirà nel prossimo triennio.

Molte altre cose che avrei voluto fare non sono state fatte. Purtroppo spesso le idee corrono più velocemente del tempo e delle forze fisiche e i giorni non bastano per fare tutto ciò che si vorrebbe. Altre volte lungaggini burocratiche, mancanza di fondi o scarsa collaborazione con chi, necessariamente, si deve interagire impediscono di realizzare buoni progetti. Ma ciò che non si è fatto oggi, si potrà forse fare domani. La vita dell'Accademia prospera

per le iniziative dei suoi membri e non per iniziativa del solo Presidente o del Consiglio Direttivo.

Fra le tante iniziative non portate a compimento cito innanzitutto la ristrutturazione edilizia della nostra sede prestigiosa. I contatti con l'ufficio tecnico dell'Ateneo, a cui fa capo la manutenzione dei locali dell'Accademia, sono iniziati subito all'inizio del mio mandato. Sono stati fatti molteplici incontri e sopralluoghi. Sono stati poi formulati progetti che riguardano l'illuminazione dell'atrio, la ristrutturazione dei servizi, la tinteggiatura delle pareti ed altro. Rimaniamo fiduciosi in attesa della loro attuazione, superate le complessità delle procedure amministrative dell'Ateneo e le necessarie approvazioni degli enti preposti.

Non si è ancora realizzata una progettualità a livello internazionale, grave carenza per una Accademia dal passato glorioso come la nostra, progettualità per la quale con l'incontro delle Accademie nel marzo 2025 si sono gettate solide basi. È questo un intento lasciato aperto alle iniziative delle Accademiche e degli Accademici e al quale io stesso cercherò in futuro di dare un contributo, con il consenso del prossimo Consiglio Direttivo.

Manca ancora una solida base economica, adeguata alle funzioni che una Istituzione prestigiosa come la nostra Accademia è chiamata a svolgere. Non è realisticamente pensabile che si possa continuare a svolgere, grazie all'impegno e al lavoro gratuito di tanti, il volume di attività di questi anni con le scarse risorse disponibili annualmente. Siamo ancora in attesa dell'esito di richieste di finanziamento relative a bandi governativi, ma questi non bastano a soddisfare le nostre ambizioni e sarebbe necessario creare partnership con enti pubblici e privati sensibili ai valori e alla mission dell'Accademia, in modo da ampliare l'orizzonte delle nostre azioni, rimanendo ovviamente negli ambiti statutari.

Concludo il mio mandato con un sentimento di profonda gratitudine per tutta la comunità accademica. Fra le tante aspirazioni che ciascuno di noi coltiva nella propria vita, personalmente non avevo mai ipotizzato la possibilità di diventare Presidente dell'Accademia delle Scienze di Bologna. È stato il regalo più bello che io abbia ricevuto nella mia vita, anche perché assolutamente inaspettato. Dopo decenni di immersione totale nel proprio settore disciplinare, il contatto con molteplici discipline e colleghi con diversa estrazione culturale è quanto di meglio possa capitare a tutti coloro che coltivano un sincero amore per la scienza, unito ad apertura mentale verso gli altri saperi. Confido che tutte le Accademiche e gli Accademici continuino a condividere questo amore e il godimento intellettuale che la nostra Istituzione continua a offrire dopo tanti secoli.

Luigi Bolondi
Presidente dell'Accademia delle Scienze dell'Istituto di Bologna

Introduzione / Introduction

L'inizio di questo millennio segna un passaggio epocale: il dialogo, e talvolta la tensione, tra la prima e l'ultima rivoluzione industriale. La rivoluzione del XVIII secolo, fondata sulla trasformazione dell'energia in lavoro produttivo, liberò l'umanità dai vincoli dello sforzo fisico. Oggi la rivoluzione dell'Intelligenza Artificiale (IA) emancipa il pensiero dai limiti biologici, avviando la trasformazione automatica dell'informazione in conoscenza. Questa trasformazione benché affascinante e ricca di promesse si trova ancora agli albori della sua traiettoria scientifica.

Energia e informazione, due concetti radicati nelle scienze dure e nel linguaggio matematico, agiscono come principi abilitanti: la prima rese autonomo il lavoro delle macchine, la seconda estende oltre i confini biologici le capacità cognitive. La storia della termodinamica ci ricorda come la tecnologia degli ingranaggi e dei motori divenne scienza grazie a Newton e Carnot; allo stesso modo, l'IA contemporanea che ha avuto il suo Turing attende la sua "termodinamica dell'apprendimento".

Come ogni rivoluzione, anche quella attuale porta con sé rischi e fragilità. La prima industrializzazione fu accompagnata da entusiasmi eccessivi, bolle speculative, squilibri sociali e un temporaneo calo dell'efficienza complessiva. Qualcosa di simile accade oggi con l'intelligenza artificiale: la rapidità della sua diffusione, l'entusiasmo degli investimenti, le aspettative sovrdimensionate e il fabbisogno crescente di energia pongono interrogativi cruciali. La lezione che la storia ci consegna è chiara: il progresso tecnologico diventa sostenibile solo quando viene trasformato in scienza, quando le sue regole profonde sono comprese e tradotte in conoscenza condivisa.

Con questa consapevolezza si apre il presente volume degli *Annales*, che attraversa epoche, discipline e prospettive. Il filo conduttore è l'intreccio tra memoria, scienza e società, dalla nascita del metodo scientifico fino alle sfide più attuali. Giovanni Jona-Lasinio ci conduce alle radici della rivoluzione scientifica, esplorando il rapporto tra arte della memoria e logica moderna. Angelo Vulpiani ripercorre la lunga vicenda dell'ipotesi atomica, da Democrito fino a Einstein e Perrin, mostrando come il moto browniano abbia fondato la fisica statistica e i processi stocastici. Marco Roccetti riflette sui timori suscitati dall'intelligenza artificiale, interpretandoli alla luce della teoria della complessità. Silvano Tagliagambe infine propone una visione filosofica e tecnica dell'intelligenza come comunicazione, ponte tra naturale e artificiale.

Accanto a questi contributi si dispiega un affresco che va dal tempo geologico di Leonardo e Stenone alle osservazioni di Spallanzani sui pipistrelli, dalle origini dell'ecografia alle sfide

idrogeologiche recenti, fino alle ricerche sul linguaggio come strumento di diagnosi precoce. È un mosaico che mostra come la scienza, nelle sue diverse forme, sia sempre stata insieme memoria del passato e apertura al futuro.

Questo volume testimonia la vocazione dell'Accademia delle Scienze di Bologna a custodire e rinnovare il patrimonio scientifico, mantenendo viva la coscienza delle radici e ponendo lo sguardo sulle trasformazioni in corso. Energia e informazione, memoria e conoscenza: i contributi raccolti qui ci ricordano che il progresso è sempre il frutto di un dialogo tra continuità e discontinuità, tra eredità storiche e sfide emergenti.

The beginning of this millennium marks an epochal transition: the dialogue, and at times the tension, between the first and the latest industrial revolution. The revolution of the eighteenth century, founded on the transformation of energy into productive labor, freed humanity from the constraints of physical effort. Today, the revolution of artificial intelligence (AI) emancipates thought from biological limits, initiating the automatic transformation of information into knowledge. Yet this transformation, though fascinating and full of promise, still stands at the dawn of its scientific trajectory.

Energy and information, two concepts rooted in the hard sciences and in the language of mathematics, act as enabling principles: the former made the work of machines autonomous, the latter extends cognitive capacities beyond biological boundaries. The history of thermodynamics reminds us how the technology of gears and engines became science thanks to Newton and Carnot; in the same way, contemporary AI, which has had its Turing, still awaits its “thermodynamics of learning”.

Like every revolution, the present one also carries risks and fragilities. The first industrialization was accompanied by excessive enthusiasms, speculative bubbles, social imbalances, and a temporary decline in overall efficiency. Something similar is happening today with artificial intelligence: the speed of its diffusion, the fervor of investments, the oversized expectations, and the growing demand for energy raise crucial questions. The lesson that history teaches us is clear: technological progress becomes sustainable only when it is transformed into science, when its underlying rules are understood and translated into shared knowledge.

*With this awareness, the present volume of the *Annales* opens, spanning epochs, disciplines, and perspectives. Its guiding thread is the interplay between memory, science, and society, from the birth of the scientific method to today's most pressing challenges. Giovanni Jona-Lasinio takes us to the roots of the scientific revolution, exploring the relationship between the art of memory and modern logic. Angelo Vulpiani retraces the long history of the atomic hypothesis, from Democritus to Einstein and Perrin, showing how Brownian motion laid the foundations of statistical physics and stochastic processes. Marco Roccetti reflects on the fears raised by artificial intelligence, interpreting them in light of complexity theory. Silvano Tagliagambe, finally, offers a philosophical and technical vision of intelligence as communication, a bridge between the natural and the artificial.*

Alongside these contributions a fresco unfolds that ranges from the geological time of Leonardo and Steno to Spallanzani's observations on bats, from the origins of ultrasound to the recent hydrogeological challenges, and to research on language as a tool for early diagnosis.

It is a mosaic that shows how science, in its many forms, has always been both memory of the past and an opening up to the future.

This volume bears witness to the vocation of the Academy of Sciences of Bologna to safeguard and renew the scientific heritage, keeping alive the consciousness of its roots while looking at the transformations now underway. Energy and information, memory and knowledge: the contributions gathered here remind us that progress is always the fruit of a dialogue between continuity and rupture, between historical legacies and emerging challenges.

Pierluigi Contucci

Professore di Fisica Matematica / Professor of Mathematical Physics,
Alma Mater Studiorum - Università di Bologna
Editor in Chief,
Annales. Proceedings of the Academy of Sciences of Bologna,
Class of Physical Sciences

L'arte della memoria e il metodo scientifico

Giovanni Jona-Lasinio

Dipartimento di Fisica e INFN, Sapienza Università di Roma

Contributo presentato da Pierluigi Contucci

Abstract

We review the problem of the possible role of the art of memory, popular in the Renaissance, in the birth of the scientific revolution during the 17th century. This was raised long ago by the historian Frances A. Yates in her book the *Art of Memory* and by the historian of the Renaissance Paolo Rossi in his book *Clavis Universalis* with somewhat different conclusions. We mention also some analogies with the 17th century culture in modern logic and computer science.

Keywords

Art of memory; Encyclopedism; Combinatorics; *Characteristica universalis*

1. Introduzione

L’ultimo capitolo del bel libro *L’Arte della Memoria* [1] della nota storica inglese Frances A. Yates si intitola: *L’Arte della Memoria e lo sviluppo del metodo scientifico*. È un accostamento interessante ma per certi aspetti sorprendente: il secolo XVII convenzionalmente è il secolo della rivoluzione scientifica e dell’adozione della matematica come linguaggio delle scienze della natura, per lo meno della fisica. D’altra parte l’Arte della Memoria spesso è legata ad aspetti irrazionali della cultura rinascimentale come la magia e l’occultismo.

Cercherò di confrontare l’idea della Yates con la visione di Paolo Rossi, storico del Rinascimento e della scienza, nell’interessante opera densa di informazioni, *Clavis Universalis* [2], facendo parlare i due autori. *Clavis Universalis* esprime un punto di vista, a mio parere, diverso.

Voglio anche considerare la possibilità che i trattati sull’arte della memoria e gli altri interessi del secolo XVII trovino riscontro, nel senso dell’analogia e delle funzioni, nello sviluppo della logica moderna e dei linguaggi simbolici tra cui la matematica. Dedicherò una parte del presente articolo alla matematica che fornisce attraverso diverse epoche un filo conduttore e il modello per i linguaggi simbolici e il cui successo nelle scienze della natura e nella tecnologia è crescente.

Iniziamo con una citazione dall’ultimo capitolo del libro della Yates ([1], p. 342)¹:

È stato scopo di questo libro illustrare il posto occupato dall’arte della memoria nei punti nevralgici della tradizione europea ... È un fatto curioso e significativo che l’arte della memoria sia conosciuta e discussa ... anche da pensatori che stanno rivolgendosi verso nuove direzioni: Francis Bacon, Descartes, Leibniz... È appunto affascinante osservare come, fra gli orientamenti del nuovo secolo [XVII], l’arte della memoria sopravviva come fattore nello sviluppo del metodo scientifico.

Una affermazione impegnativa. Gli argomenti che la Yates porta a sostegno della propria tesi si basano soprattutto sulla conoscenza che Bacon, Descartes e Leibniz, ... fautori di nuove prospettive, avevano dell’arte della memoria e del carattere sistematico (problema del metodo) dei trattati relativi.

2. L’arte della memoria

È un argomento inconsueto negli studi di storia della scienza. L’arte della memoria ha radici nell’antichità greco-romana. Stando alla tradizione, ne parla Cicerone nel *De Oratore* e Quintiliano nella *Institutio Oratoria*, il poeta Simonide di Ceo partecipò a un banchetto finito tragicamente per il crollo della sala con la morte di tutti i commensali meno il poeta che si salvo fortuitamente. Ci fu il problema dell’identificazione dei corpi sfigurati ma Simonide ricordava

¹ Qui e nelle successive citazioni uso la seguente convenzione: puntini ripetuti ... : omissione di parole di testo; parole tra parentesi quadre: mia inserzione per rendere comprensibile il testo.

i posti in cui i partecipanti erano seduti e poté indicare chi fosse ciascun occupante. Simonide, considerato l'inventore dell'arte della memoria, si rese conto dell'importanza di associare a dei luoghi, *loci*, ciò che si vuole ricordare. Come sottolinea la Yates ([1], p. 4):

Non è difficile afferrare i principi generali della mnemonica. Il primo passo consisteva nell'imprimere nella memoria una serie di loci o luoghi. Il più comune, benché non il solo tipo di sistema mnemonico di luoghi fu il tipo architettonico. La descrizione più chiara del processo è quella data da Quintiliano.

Per formare una serie di luoghi nella memoria, egli dice, si deve ricordare un edificio, il più spazioso e vario possibile, con atrio, soggiorno, camere da letto, sale, senza dimenticare statue e altri ornamenti che abbelliscono le stanze. Le immagini che devono richiamare il discorso ... sono poste con l'immaginazione nei luoghi dell'edificio già fissati nella memoria. Fatto questo non appena la memoria dei fatti chiede di essere rivissuta, vengono visitati di volta in volta tutti questi luoghi e i vari depositi sono richiesti indietro ai loro custodi. ... Questo metodo assicura il ricordo dei vari punti nel giusto ordine, dal momento che l'ordine è fissato dalla successione dei luoghi nell'edificio ... Non c'è dubbio che questo metodo funzioni con chiunque sia disposto a lavorare seriamente a questa ginnastica mnemonica ...

... La formazione dei loci è della massima importanza, perché lo stesso sistema di loci può essere usato ripetutamente per ricordare materiale diverso. Le immagini che abbiamo collocato in essi per ricordare un sistema di cose svaniscono e si cancellano quando non ce ne serviamo più.

Per scelte dei luoghi diverse dal tipo architettonico vedi il capitolo quinto di [1]. Si tratta di un'arte la cui importanza è massima prima dell'invenzione della stampa (circa 1450), ma l'interesse per l'*ars memorativa* permane oltre. Così scrive Paolo Rossi a proposito della sopravvivenza dell'interesse per l'arte della memoria nel Rinascimento ([2], p. 59):

Quell'arte dei luoghi e delle immagini, nonostante la sua apparente neutralità e atemporaliità era legata alla cultura del Rinascimento da una molteplicità di rapporti ... Chi riflette sull'importanza dei segni, delle imprese e delle allegorie nella cultura rinascimentale, ... non potrà non rilevare la risonanza che l'arte della memoria in quanto costruttrice di immagini era destinata ad avere in una età che amava incorporare le idee in forme sensibili, ..., che concepiva verità e realtà come qualcosa che si va progressivamente rivelando attraverso segni, 'favole', immagini.

Riportiamo alcune considerazioni di Paolo Rossi che chiariscono la sua idea sul ruolo dell'*Ars memorativa* nella rivoluzione scientifica. Altri temi della cultura del secolo XVII, legati all'arte della memoria furono l'enciclopedismo e la costruzione di una lingua universale a cui i matematici furono particolarmente interessati. L'arte della memoria affrontò per la sua stessa natura problemi di *metodo*.

Paolo Rossi afferma ([2], p. 228):

Le ricerche tendenti alla costruzione di una lingua “filosofica” o “perfetta” trovarono un terreno favorevole nell’atmosfera culturale. … Le esigenze di chiarezza e di rigore, di una lingua simbolica trassero senza dubbio alimento anche dagli sviluppi degli studi matematici, ma sarebbe un’impresa disperata sostenere che le lingue universali dipendano o storicamente derivino da quegli sviluppi.

Ancora Paolo Rossi ([2], p. 63):

… la passione per la combinatoria [definita in seguito] [3] entro la cultura europea … [è] una tematica che è del tutto estranea ad una mentalità post-cartesiana e post-galileiana [fatto] sfuggito sia a quegli interpreti che hanno visto nell’*ars magna* [di Raimondo Lullo²] una specie di sommario ‘preistorico’ di logica simbolica, sia a coloro che hanno preferito sbarazzarsi, con facile ironia, delle ‘stranezze’ di molti fra gli esponenti più significativi di quella non trascurabile stagione della cultura occidentale.

Paolo Rossi quindi non sembra condividere l’idea di un ruolo importante dell’arte della memoria nell’affermarsi della nuova scienza, piuttosto gli attribuisce un ruolo indiretto.

Paolo Rossi ha ragione?

L’arte della memoria ha avuto legami con l’ermetismo, le scienze occulte, la magia, la Cabala oltre a motivazioni religiose per cui una implicazione nella nascita della nuova scienza e una connessione stretta o continuità storica con la rivoluzione scientifica, non è ovvia. Se nuovi documenti o interpretazioni non rinforzano la tesi della Yates, ritengo condivisibili gli argomenti di Paolo Rossi espressi in *Clavis Universalis*.

La questione diviene più semplice se cerchiamo delle analogie tra la struttura e funzioni dell’*ars memorativa* e metodiche moderne che rispondono a esigenze nate in epoca recente specialmente dopo l’invenzione dei calcolatori elettronici digitali. Oggi la memoria è parte integrante di un computer.

Faccio un esempio con il linguaggio *tex* largamente usato, insieme al *latex*, per la stesura degli articoli di matematica o che contengono molte formule. In questo linguaggio le formule vengono *descritte* con un minimo di simboli predefiniti nella memoria della macchina, che rappresentano operazioni matematiche di base, evitando di creare un nuovo programma per ogni nuova formula. Tutti i cosiddetti linguaggi di programmazione hanno caratteristiche analoghe.

Esistono diversi tipi di linguaggi, ciascuno con caratteristiche e finalità differenti ma tutti permettono un risparmio notevole di energia mentale, sono inoltre un grande aiuto per la memoria e in questo senso avere una funzione che ricorda quella che a suo tempo hanno avuto i trattati di *mnemotecnica*.

² Maiorca (1232-1316), filosofo, teologo, poeta, mistico catalano la cui influenza durò fino alla fine del Seicento.

I linguaggi di programmazione sono strumenti che permettono di comunicare con i computer, dando loro istruzioni precise su cosa fare. Sono l'equivalente di una lingua scritta che, oltre a essere compresa dagli esseri umani, viene interpretata dalle macchine³.

2.1. L'arte della memoria e l'enciclopedia nel Seicento

Dal capitolo sesto di ([2], p. 199), sezione 1. *Il sistema mnemonico universale: Enrico Alsted:*

L'ideale encicopedico che, da Bacon a Leibniz, domina la cultura del Seicento, si mostra operante, con forza singolare, nell'opera vastissima di Enrico Alsted (1588-1638). ... Rifor-mare le tecniche di trasmissione del sapere; dar luogo ad una classificazione sistematica di tutte le attività manuali e intellettuali; questi progetti coincidono, per Alsted, con la costruzione di un nuovo 'sistema delle scienze' che riunisca in un unico *corpus* i principi di tutte le discipline. Attraverso l'enciclopedia, che porta alla luce la sistematicità del sapere, potrà essere costruito un nuovo metodo e potrà essere definito un nuovo e razionale piano degli stu-di. L'adesione di Alsted alla tematica del lullismo, la sua insistenza sul valore della memoria come tecnica dell'ordinamento encicopedico ...

Questa descrizione richiama l'*International Encyclopedia of Unified Science* [4] un progetto tipico del secolo XX dovuto al Circolo di Vienna⁴. Otto Neurath, uno degli editori dell'Enci-clopedia, così ne caratterizza lo scopo in un articolo introduttivo dal titolo *Unified Science as Encyclopedic Integration:*

The International Encyclopedia of Unified Science aims to show how various scientific acti-vities such as observation, experimentation, and reasoning can be synthesized, and how all these together help to evolve unified science ... this Encyclopedia continues the work of the famous French Encyclopedie in this and other respects.

2.2. L'Ars Combinatoria e la Caratteristica Universale di Leibniz

L'Ars Combinatoria è un'opera giovanile di Leibniz [3]. *L'Ars Combinatoria* è così definita nel *Dizionario Filosofico Treccani*:

Ars Combinatoria fu designata da Leibniz quella che già Raimondo Lullo aveva battezzato *Ars magna*, e cioè la simbolizzazione di contenuti di pensiero attraverso un sistema di se-gni linguistici, numerici, schemi e figure, manipolabili formalmente e flessibilmente tram-i-te principi sintattici combinatori. Il progetto leibniziano dell'*ars combinatoria* promuoveva

³ Questi linguaggi sono stati sviluppati da cultori delle cosiddette scienze dure ma attualmente c'è molto interesse anche da parte degli umanisti. Vedi ad esempio il recente convegno presso l'Accademia dei Lincei su *Intelligenza Artificiale e Discipline Umanistiche* la cui registrazione si può vedere al seguente link: <https://www.lincei.it/it/video/10012025-intelligenza-artificiale-e-discipline-umanistiche>.

⁴ Il circolo di Vienna fu un circolo filosofico e culturale animato da numerosi filosofi e scienziati del tempo. L'approccio filosofico del Circolo, noto come positivismo logico (o neopositivismo) o anche fisicalismo, si diffuse nel resto dell'Europa e nei paesi di lingua inglese.

così la possibilità di scoprire verità di pensiero come esito dell'applicazione di regole di combinazione a partire da una lista di nozioni primitive. La meccanizzazione del ragionamento, ridotto a calcolo formale, avrebbe evitato confusione, incoerenza, ambiguità. Sotto vari aspetti l'*ars combinatoria*, precorre l'idea dell'aritmetizzazione delle leggi logiche leggi del pensiero nella teoria logica di G. Boole

o nelle parole di Leibniz [3]:

DISSERTAZIONE SULL'ARTE COMBINATORIA

in cui dai fondamenti dell'Aritmetica si stabilisce con nuovi precetti la Dottrina delle Complicazioni e delle Trasposizioni e si dimostra l'utilità di entrambe per la totalità delle scienze e si gettano inoltre nuovi semi dell'Arte del Meditare ossia della Logica della Scoperta.

Per l'analisi della Caratteristica universale di Leibniz e al suo legame con i trattati dell'Arte della Memoria nel secolo XVII rimandiamo alle due opere qui discusse [1, 2]. Per la parte che qui ci interessa ([2], p. 222):

Alla creazione di una lingua universale e artificiale, che elimini la confusione delle lingue naturali e ne superi le imperfezioni. ... si dedicheranno nella seconda metà del secolo, non pochi cultori inglesi di logica e di problemi del linguaggio. ... Per comprendere il significato di queste opere e la funzione storica da esse esercitate, per intendere l'atmosfera culturale dalla quale esse trassero alimento e dalla quale derivarono le ragioni della loro diffusione e del loro successo, bisognerà tener conto [dei] grandi fenomeni storici che caratterizzano (per quanto qui ci concerne) la vita intellettuale inglese nella prima metà del secolo XVII ... [tra cui] la profonda azione esercitata in Inghilterra dall'opera di Bacon e dai gruppi 'baconiani' della Royal Society, impegnati in una dura lotta contro la retorica del tardo umanesimo e in un'appassionata difesa della nuova scienza;

e Frances Yates ([1], p. 352):

Ma chi fornisce l'esempio più notevole della sopravvivenza di influssi dell'arte mnemonica e del lullismo nella mente di una grande figura del secolo XVII è senz'altro Leibniz. Naturalmente, è generalmente noto che Leibniz si interessò del lullismo e scrisse un'opera *De arte combinatoria* [3], basata su adattamenti del lullismo, quello che non è altrettanto noto, nonostante sia stato avvertito da Paolo Rossi, è che Leibniz ebbe assai familiari le tradizioni dell'arte di memoria. In effetti gli sforzi che Leibniz dedicò all'invenzione di un calcolo universale ... possono essere visti, senza esitazione, come derivazione storica di quegli sforzi che il Rinascimento dedicò a una combinazione del lullismo con l'arte della memoria: sforzi di cui Giordano Bruno fu un esempio così importante.

3. La matematica è un linguaggio naturale?

Da utilizzatore della matematica in fisica voglio indicare quali sono gli argomenti che mi fanno considerare la matematica affine alle lingue naturali. Cosa lega questo argomento agli altri di questo articolo? Abbiamo sottolineato il ruolo di modello della matematica per i linguaggi simbolici.

Il mio apprendimento della matematica, linguaggio della fisica, è avvenuto come l'apprendimento di una lingua straniera, come se stessi in un paese dove la necessità di comunicare mi spingesse a imparare la lingua del posto. Mi sono sentito vicino al positivismo logico del Circolo di Vienna per cui la matematica è un linguaggio. Punto di vista chiaramente descritto da Rudolf Carnap (1891-1970), uno dei fondatori del circolo, nei capitoli della *International Encyclopedia of Unified Science* intitolati *Logical Foundations of the Unity of Science* e *Foundations of Logic and Mathematics* [4] e nel suo famoso libro del 1937 *The Logical Syntax of Language* [5].

Nella accezione di Carnap e del circolo di Vienna la parola *linguaggio* ha un significato generale e viene applicato anche ai sistemi formali della logica moderna. Osserva Carnap che nella accezione prevalente la sintassi e la logica hanno qualche punto in comune ma sono teorie essenzialmente diverse. Compito della sintassi è formulare regole per costruire le strutture linguistiche (per esempio le frasi) a partire dalle parole mentre la logica deve formulare regole per arrivare a conclusioni certe a partire da premesse dichiarate. Sottolinea Carnap che gli sviluppi della logica hanno mostrato che può essere studiata con precisione solo quando si basa non su giudizi ma su espressioni linguistiche.

Il suo punto di vista apparentemente non è condiviso da Gödel, il maggiore logico del ventesimo secolo che inizialmente fece parte del circolo. L'opinione di Gödel in realtà non è ben definita come appare dall'introduzione di Warren Goldfarb agli scritti di Gödel su *La matematica è sintassi del linguaggio?* [6]:

Il suo disaccordo con i positivisti sta nel fatto che egli considera il dominio dei concetti come una realtà indipendente, alla quale le idee di oggetto, fatto e contenuto si applicano nello stesso modo in cui avviene per la realtà empirica ... Se questa interpretazione è corretta, allora le affermazioni che fa sul ruolo dei concetti nella verità matematica diventano formulazioni dirette del suo platonismo.

Il rapporto tra la precisione del linguaggio matematico e le osservazioni delle scienze della natura risale a un ben noto punto di vista di Galileo, discusso nel *Dialogo*, che sottolinea come gli enti matematici non siano mai completamente realizzati in natura e costituiscono un riferimento ideale. Viene così introdotto un principio metodologico di tutta la fisica moderna e cioè la spiegazione dei fenomeni attraverso i casi ideali.

La preoccupazione dei fisici contemporanei è stata piuttosto capire il perché del successo della matematica nella fisica e più in generale nelle scienze della natura. In un articolo che scrissi una ventina di anni fa *La matematica come linguaggio delle scienze della natura* [7] dichiaravo:

... vogliamo fare un po' di fenomenologia della interazione tra matematica e scienze della natura facendoci guidare dal rapporto più maturo con la fisica. Cercherò di convincervi che le cose non sono affatto semplici perché l'uso della matematica è molteplice e il fondamento di tale uso è spesso sfuggente al punto che il suo successo è stato definito da Wigner, in un noto articolo dal titolo *The unreasonable effectiveness of mathematics in the natural sciences*, una legge empirica dell'epistemologia [8]. Purtroppo l'articolo di Wigner, attraente e stimolante nel titolo, risulta deludente nelle conclusioni. Infatti dopo una ampia presentazione di dati di fatto, che permetterebbero di entrare nel vivo di un problema di grande interesse, conclude bruscamente con l'affermazione "The miracle of the appropriateness of the language of mathematics for the formulation of the laws of physics is a wonderful gift which we neither understand nor deserve".

Alle affermazioni di Wigner fa riscontro l'articolo più recente del noto matematico Atiyah *On the unreasonable effectiveness of physics in mathematics* [9].

The reconvergence [of mathematics and physics] is remarkable in that it has connected the frontier areas of both fields. It is not a matter of application of old results of one field to the problems of the other but rather the current work in each field is leading to new results in the other. The reconvergence has in fact created a revolution in mathematics, with a wide range of problems ... being solved using new ideas imported from physical theory, in particular quantum theory.

La domanda spontanea a cui si vorrebbe rispondere è: c'è un motivo che giustifichi l'efficacia della matematica nella descrizione della natura? Wigner sottolinea che per lo scienziato naturale la matematica è innanzi tutto un linguaggio. Mi pare tuttavia che la sua efficacia sia altrettanto misteriosa di quella delle lingue ordinarie con cui, nella vita quotidiana, riusciamo a formulare concetti nuovi, a descrivere e predire fatti oggettivi e ad agire sulla realtà.

Apparentemente una lingua naturale si forma ed evolve sotto la pressione della necessità. Vi è tuttavia un momento in cui codifica le regole per l'uso (grammatica e sintassi) che, se applicate correttamente, permettono di incontrarsi nuovamente e con successo con la realtà (predizioni). La matematica, pur nella sua specificità, non segue vie sostanzialmente diverse.

A sostegno del mio punto di vista citavo e lo riporto anche qui, un esempio di costruzione di linguaggio matematico di base sotto la pressione di una necessità seguendo un ben noto testo di Poincaré [10]. Si tratta del continuo matematico che, come sottolinea Poincaré, è correlato all'esperienza fisica ma non ne è affatto una ovvia concettualizzazione. Infatti il continuo fisico non esiste, anzi è un concetto contraddittorio come mostra il seguente argomento.

Le misure fisiche hanno sempre una precisione finita che in un opportuno sistema di misura facciamo corrispondere a una unità. Ciò implica che non possiamo distinguere le quantità A e $B = A + 1$ e quindi $A = B$. Possiamo invece distinguere A e $A + 2 = C$ mentre risulta $B = C$. È violata quindi la proprietà transitiva poiché $A = B$, $B = C$ ma A è diversa da C. Per una discussione dettagliata della costruzione del continuo matematico rinviamo al testo di Poincaré citato e concludiamo con Poincaré che tale concetto "a été créé de toutes pièces par l'esprit mais c'est

l'expérience qui lui en a fourni l'occasion". La ricerca delle buone idealizzazioni è cruciale per la fisica e non c'è dubbio che il continuo matematico sia un concetto base di tutta la fisica classica.

Voglio aggiungere un aspetto dell'interazione tra la fisica attuale e la matematica, importante ai nostri giorni. Mi riferisco alla fisica delle interazioni fondamentali delle particelle elementari in cui negli ultimi decenni la matematica ha avuto un ruolo di primo piano nello studio di fenomeni che avvengono su scale spaziali molto piccole, più piccole della scala atomica. Si tratta quindi di una fisica in cui il contatto tra l'osservatore e l'oggetto è molto indiretto e avviene attraverso strumentazioni intermedie sempre più complesse. Questa *distanza* dell'oggetto in studio dall'osservatore condiziona notevolmente la costruzione delle teorie. Il ruolo della matematica si è rivelato essenziale per cercare e selezionare possibili forme della teoria.

Il perché la matematica, come le lingue naturali, abbia un tale successo rimane tuttora irrisolto e il più noto linguista della nostra epoca, Noam Chomsky, parla di mistero del linguaggio [11]. Potrebbe dipendere dai successivi adattamenti nella evoluzione biologica e oggi ci sono aspettative dalle neuroscienze. Non è chiaro tuttavia se la matematica possa avere nella biologia un ruolo altrettanto determinante come in fisica e forse nuovi linguaggi devono essere inventati [12].

4. Alcune conclusioni

Ho richiamato l'attenzione su un problema di storia della scienza sollevato da F.A. Yates molti anni fa che ritiene ci sia una continuità storica tra la cultura generale del secolo XVII, in particolare dell'arte della memoria, e la rivoluzione scientifica. L'ho confrontato con il punto di vista, diverso e più sfumato, di Paolo Rossi. Tuttavia penso che i due modi di vedere non siano completamente antitetici e possano trovare una sintesi. Purtroppo entrambi sono scomparsi e questo è un compito per gli storici.

È utile, in conclusione, richiamare quanto Paolo Rossi afferma nella prefazione alla seconda edizione di [2] del 1983:

Nel suo libro sull'arte della memoria, Frances A. Yates ha richiamato l'attenzione su due punti che mi sembra utile sottolineare. Il primo concerne la vitale importanza delle arti o corsi o aiuti o tecniche della memoria nel mondo antico, privo della stampa ... Nella "visita interiore" e nella "memorizzazione visiva" che consentiva di passare dalla visione dei luoghi e delle immagini alle parole, la Yates tendeva a vedere qualcosa di "misterioso" quasi una facoltà un tempo presente ed ora irrimediabilmente perduta. ... Il secondo punto, sottolineato dalla Yates, è relativo alla "marginalità" storica del discorso sulle arti della memoria. Trascurato perché "non di pertinenza di nessuno", esso si rivela invece "affare di tutti": la storia dell'organizzazione della memoria "tocca punti vitali della storia della religione e dell'etica, della filosofia e della psicologia dell'arte e della letteratura e infine del metodo scientifico".

Non mi resta che consigliare la lettura integrale di [1, 2] incluse le prefazioni delle varie edizioni.

Ho inoltre richiamato possibili analogie, specialmente per le funzioni, tra l'arte della memoria e i linguaggi inventati per parlare con i calcolatori. Ho sottolineato possibili analogie tra l'enciclopedismo rinascimentale e la *International Encyclopedia of Unified Science* un progetto del secolo XX. E infine l'analogia tra la matematica e le lingue esistenti.

Ringraziamenti

Ringrazio Pierluigi Contucci per l'invito a collaborare con gli Annales dell'Accademia delle Scienze di Bologna.

Bibliografia

1. Yates, F.A. *L'arte della memoria*. Einaudi: Torino, 1972, 1993.
2. Rossi, P. *Clavis Universalis*. Il Mulino: Bologna, 1983³, 2000, 2024.
3. Leibniz, G.G. *Scritti di Logica*, a cura di F. Barone, Zanichelli: Bologna, 1968.
4. Neurath, O., Carnap, R., Morris, Ch. (eds.) *International Encyclopedia of Unified Science*. Vol. 1, part 1, The University of Chicago Press: Chicago, 1938.
5. Carnap, R. *The Logical Syntax of Language*. Kegan Paul, Trench & Trubner & Co.: London, 1937.
6. Goldfarb, W. in *Kurt Gödel. Scritti scelti*, a cura di G. Lolli. Bollati Boringhieri: Torino, 2011.
7. Jona-Lasinio, G. La matematica come linguaggio delle scienze della natura, *Quaderni della Scuola Normale Superiore di Pisa*, 2005, 93.
8. Wigner, E. The unreasonable effectiveness of mathematics in natural sciences. *Comun. Pure Appl. Math.*, 1960, XIII, 1.
9. Atiyah, M. On the unreasonable effectiveness of physics in mathematics. In *Highlights of mathematical physics*, ed. by A.S. Fokas, J. Halliwell, T. Kibble, and B. Zegarlinski. American Mathematical Society: Providence (RI), 2002.
10. Poincaré, H. *La science et l'hypothèse*. Ch. II, Flammarion: Paris, 1968.
11. Chomsky, N. *Il mistero del linguaggio. Nuove prospettive*. A cura di M. Greco, edizione italiana concordata con l'autore, Cortina: Milano, 2018.
12. Jona-Lasinio, G. Modelli e linguaggi matematici nello studio dei problemi biologici. *Lettura Matematica Pristem*, 2012, 83, 14-20.

Il tempo geologico, il Diluvio, Leonardo, Stenone

Gian Battista Vai

Dip BiGeA, Museo Geologico Giovanni Capellini, SMA, Alma Mater Studiorum – Università di Bologna; Accademico Emerito

Abstract

The concept of deep geologic time is a two-century-old assessment first documented by the recognition of the evolution of organic life on Earth (fossils), and later backed up by the numerical dating provided through the radiometric decay of unstable chemical elements, and the astronomical forcing in depositional processes and related sedimentary rocks. Together with the growth of modern geological principles, the geochronological time scale was established beginning with Leonardo da Vinci (1452-1519) and Niels Steensen (1638-1668).

Keywords

Stratigraphy, Fossil question, Principles, Geological history, Experimental science, Earth's age

1. Introduzione

Le pagine più affascinanti sui concetti di tempo ed eternità sono state scritte da S. Agostino nelle *Confessioni* (libro undicesimo, 11. 13., seg.), con l'ovvio perdurante mistero, tanto da non saperne dire un inizio e non conoscerne la fine, in Dio o nell'eternità misteriosa di Lucrezio. Ma per la stragrande maggioranza delle culture l'età della Terra fin verso la fine del 1700 era quella biblica o quella delle teorie cosmogoniche, cioè qualche migliaio di anni. È nota poi la disputa fra il maggior fisico del 1800, Lord Kelvin (artefice dello zero assoluto della scala della temperatura) e i geologi, capeggiati da Charles Lyell. Kelvin, forte della presunzione teorica e deduttiva (poco galileiana) sul non rigore delle Scienze Naturali e della Geologia in evoluzione, tuonava, in modo ultimativo e dogmatico, che la Terra "non poteva essere più antica di 20 milioni di anni". I geologi, invece, parlavano di alcune centinaia di milioni di anni e avevano tutte le ragioni. Si è dovuto attendere il 1937, con la scoperta del decadimento radioattivo naturale, per fare un salto di un ordine di grandezza, e arrivare a un'età della Terra di 4,6 miliardi di anni, condivisa da geologi e astrofisici.

Nicola Stenone (1638-1686) arriva a Pisa in uno dei primi giorni di primavera del 1666. Lo certifica una breve lettera del Principe Leopoldo di Toscana (1617-1675) a un ignoto destinatario datata 27 aprile 1666. Al foglio 3 della lettera si legge in un italiano un po' incerto

sono stati di passaggio di quà de quali / le ho scritto credo altre volte, che sono il / Sig Steno-
ne Danese Anatomico gioviene / di età ma insigne nel suo mestiere medico / poi di ogni sorta
di erudizione e geometria fatto il che questo li giova al suo mestiere / et il Metodico della
Modestia. L'altro / è il Sig I Estelot francese...

È un profilo sintetico, quasi un medaglione, del già famoso scienziato e dell'uomo, a cui oggi ci sarebbe da aggiungere solo 'e Geologo' ad "Anatomico". Aveva 28 anni¹.

Subito Stenone "Anatomico" viene messo per competenza alla prova dello studio dello squalo appena catturato e tirato sulla spiaggia di Livorno il 26 ottobre 1666. Ha già dimostrato la sua perizia settoria. Ma quella diventa la sua prima occasione per affrontare il problema cruciale dell'origine dei fossili e diventare egli stesso geologo (*Canis carchariae dissecatum caput*, 1667). La seconda occasione seguirà a breve con le escursioni attraverso i colli, le valli, e le cave della Toscana (e si confermerà in quelli successivi del Bolognese, del Veneto, e delle Alpi). Tutto ciò avverrà nel breve lasso di un triennio.

Dello studio del pescecane di Livorno si cita spesso il passo in cui Stenone ricorda che l'amico Carlo Dati (1619-1676), e collega accademico del Cimento, gli offrì l'uso delle due tavole del manoscritto di Michele Mercati (1541-1593) sul capo, i denti, e le glossopetre di squalo della *Metallotheca Vaticana*, che sarebbe stata pubblicata postuma da Lancisi nel 1717 [2] (Fig. 1)².

Pochi ricordano, però, che nella seconda metà del Cinquecento nel museo di Ulisse Aldrovandi (1522-1605) a Bologna erano esposte mandibole di squalo pubblicate nel *De Pisci-*

¹ L'amico e collega Troels Kardel mi ha chiesto di trascrivere il testo della lettera per verificarne la traduzione inglese, che però è stata stampata prima che egli la potesse completare [1].

² Tutte le immagini sono pubblicate a colori nell'edizione online degli *Annales*.

bus (Aldrovandi 1618, pp. 381-382), opera postuma certamente presente nella biblioteca dei Granduchi [2]-[8] (Fig. 1). Né Dati né gli altri amici dell'Accademia del Cimento, e di riflesso neanche Stenone, ne erano a conoscenza? Non pare probabile, a meno di ritenere il *Canis Carchariae* e il *De Solido* di Stenone come semplici rapporti interni sintetici per il principe. Ecco comunque un tema che andrebbe indagato.

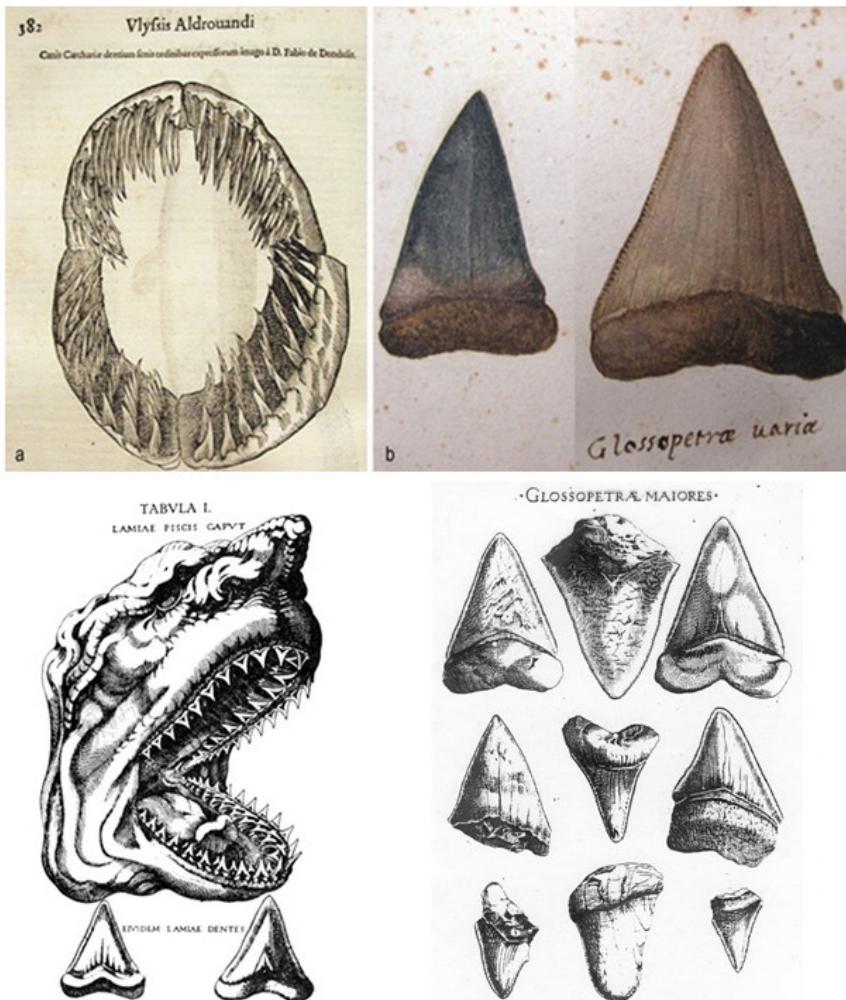


Fig. 1. Mandibola e mascella di *Canis Carchariae* moderno figurati nel *De Piscibus* di Aldrovandi 1618 postumo (a) e denti di squalo fossili (*Glossopetrae*) figurati nelle *Tavole Acquarellate* di Aldrovandi (b) (da Vai, G.B.; Caldwell W.G.E. [eds.], *The Origins of Geology in Italy*; The Geological Society of America Special Paper 411; 2006; pp. 43-63, per gentile concessione della Biblioteca Universitaria di Bologna) (sopra). Tavola con capo e denti di pescecane per la *Metallotheca Vaticana* di M. Mercati, stampata postuma da Lancisi nel 1717 (sotto).

In passato ho già apprezzato la grandezza di Stenone [5], danese di nascita ma italiano e fiorentino di adozione, capace di reinventare i principi della geologia moderna a soli 150 anni dal genio supremo di Leonardo [9]-[17]. L'Italia aveva già ospitato il 2° Congresso Geologico Internazionale (CGI) a Bologna nel 1881. Nell'occasione il presidente Capellini aveva portato a Firenze

200 partecipanti da ogni parte del mondo in visita alla tomba di Stenone, allora nei sotterranei di San Lorenzo, inaugurando una lapide nel chiostro della Basilica in ricordo della visita [18].

Mi ripromisi di non fare di meno nel 2000 quando, visitando la Cappella del nuovo beato, lessi la lapide che ne tesseva le lodi di eccelso anatomista, senza nulla aggiungere sul geologo. Oggi nella Cappella un'altra lapide ricorda ai molti visitatori e fedeli devoti che il Beato Stenone è anche padre della geologia. Preparammo coi colleghi fiorentini (in particolare Curzio Cipriani) la nuova lapide che fu inaugurata dal Cardinal Antonelli nell'agosto 2004 alla presenza di molti dei quasi 8000 geologi convenuti a Firenze da tutto il mondo per il 32° CGI [19].

Da allora ho avuto varie occasioni di approfondire l'opera geologica di Stenone [20]-[23] (dopo aver incrociato i miei passi con alcuni di quelli dell'opera sterminata di Leonardo [9]-[13]). La ricorrenza del 350° del *Prodromus* di Stenone e del 500° della morte di Leonardo mi ha offerto l'occasione di affrontare altri aspetti geologici della grande opera stenoniana, vista in un'ottica comparata con quelli del genio leonardesco. Sono due, in particolare, che attestano una qualche debolezza di Stenone se confrontato con Leonardo, e cioè il Diluvio e il tempo geologico, pur a fronte di tanta sua forza e razionalità.

2. Stenone vs. Leonardo

Sorprende che a distanza di oltre 150 anni l'uno dall'altro i due abbiano duplicato quasi le medesime scoperte geologiche, a partire dall'osservazione della stessa regione, la Toscana, in un tempo in cui essa era al centro dell'evoluzione culturale e scientifica del mondo occidentale.

Quasi tutte le scoperte geologiche di Stenone sono riassunte nel *Prodromus* (1669). A lui da tempo vengono attribuiti i primi tre principi della geologia, in ordine di formulazione: Orizzontalità iniziale, Continuità iniziale, e Sovrapposizione degli strati. Ma anche il quarto, Atтуalismo, lo condivide con il suo banditore più noto [24]. Esso è una sorta di corollario, o formulazione limitativa, di un principio più composito formulato da James Hutton nel 1795 e poi chiamato Uniformismo [25], [26]. La ragione per cui molti si limitano ad attribuirgli solo i primi tre sta nel fatto che Stenone certo ammette che i processi geologici che egli descrive in Toscana siano effetto di forze alterne legate al fuoco e all'acqua; però di fatto egli esemplifica quasi solo quelli dell'acqua, fondando più che altro una Geologia del Sedimentario, che chiama inopinatamente "studi di Fisica e Geografia = *Physicaes, Geographiae studia*" (p. 5 del testo originale). Questa era anche una buona definizione del suo campo di lavoro quando, purtroppo, la nuova parola Geologia non era ancora uscita dal testamento di Ulisse Aldrovandi (1522-1605) [27]. Stenone è anche e soprattutto colui che nella sua breve epitome usa la parola latina "stratum" per 101 volte a partire dalla pagina 17. E almeno 4 volte la parola "experimenta" o "experientia" nella sola introduzione (prime 9 pagine). Ma in quanto all'uso della parola "esperienza" Leonardo non è certamente da meno.

2.1. Vediamo alcuni aspetti topici del *Prodromus*

Sorprende la rapidità con cui Stenone metabolizza due conversioni, alla geologia e al Cattolicesimo [21] dall'arrivo in Italia. In due soli anni, dal 1666 al 1668, sarebbe stato in grado di scrivere il suo *opus magnus* sulla geologia, per limitarsi solo occasionalmente all'epitome felice,

peraltro rivoluzionaria, anche se lui si scusa col Principe della “sua lentezza” (p. 3). Questo è un indice evidente di elasticità mentale, che spicca in modo esemplare nell'affermazione secca “non tutti i monti attuali sono esistiti dall'inizio dell'universo” (p. 33) con una non velata critica a un altro grande pensatore religioso come Kircher [28], purché non ci fosse un'esplicita preclusione scritturale. Ma è anche indice di intuizione fulminea della geologia toscana “dopo aver visto una e due volte le terre” (p. 2).

È molto importante non sorvolare sul riferimento anonimo che Stenone fa a “numerosi contributi ottimamente scritti da molti” sul problema “degli oggetti marini rinvenuti lontano dal mare” (p. 5). È ovvio che li conoscesse, compresi quelli stampati (e non solo) di Aldrovandi che era in scambio epistolare e scientifico col Granduca [8], [21], ma non li citava, o per la brevità dell'epitome, o perché spesso così capitava a quei tempi.

Scopo di Stenone è “dimostrare i punti principali in breve e [...] chiaramente” (pp. 6, 7), seguendo quindi il metodo cartesiano: “ho esaminato con scrupolo le sue sezioni [del problema] una a una” (p. 8). Non deve sorprendere, Stenone non criticava il metodo, ma i contenuti e le affermazioni a cui Cartesio perveniva applicando male il suo metodo [21], [29].

Neppure Stenone però è esente da sottili contraddizioni. Infatti, afferma che quello che espone “riguardo la determinazione del moto si adatta a ogni fattore movente” (p. 12), indipendentemente dalla scuola scientifica, filosofica o teologica; ma poco prima ha proposto “che il diluvio universale non è in contraddizione con le leggi dei movimenti naturali” (p. 6). Vero questo solo se non si pretende che faccia ciò che non può fare (trasportare cioè tutti i fossili nelle torbide che daranno vita a tutti gli strati fossiliferi).

Risultato basilare della ricerca stenoniana sulla geologia della Toscana sta nell'individuare sequenze logiche temporali relative che partono dai corpi solidi (conchiglie e minerali) contenuti negli “strati che deposita l'acqua torbida” (p. 17), sequenze che vengono poi esemplificate ripetutamente nei processi sedimentari, minero-petrografici, e nelle incrostazioni (pp. 26, 30, 41, 42). Una ulteriore affermazione del criterio di cronologia relativa è formulata in chiave anti-kircheriana:

I monti possono essere rovesciati, i campi trasportati da un lato all'altro, rispetto a una strada pubblica; le vette dei monti possono essere innalzate e abbassate; le terre possono essere aperte e di nuovo chiuse; e accadono altre cose di tal sorta che, nella lettura della storia, le considerano come leggende coloro che cercano di evitare fama di creduloni (p. 34)³.

Ebbene, questa è prima di tutto una visione mobilista, quasi evolutiva, della storia della Terra – nella sostanza non molto dissimile da quella leonardesca, ma anche di L.B. Alberti e G. Fracastoro [30], ma in termini assai vicini a quelli usati nei Salmi – che si completa nell'ultima parte del *Prodromus*.

Altro fattore decisivo della ermeneutica stenoniana è l'uso sistematico del criterio di similitudine, già applicato nello stesso modo nella tassonomia aldrovandiana, e che per oltre tre secoli dominerà la classificazione biologica e paleontologica, Linneo compreso: “corpi [...] simili in tutto a parti di piante e di animali” (p. 17).

³ Tutte le citazioni del *Prodromo* sono desunte dalla versione italiana di Luca Paretti in [28].

La prima formulazione stampata del Principio di Orizzontalità iniziale è sua: “La superficie superiore dei sedimenti è parallela all’orizzonte, o per lo meno poco deviante rispetto a esso” (p. 27). Segue poco dopo quello della Continuità iniziale:

nell’epoca nella quale prendeva forma un qualsiasi strato [...] ricoprì l’intero globo terrestre [...] in qualsiasi luogo si osservino i fianchi scoperti degli strati [...] bisogna ricercare la *continuazione* degli stessi strati (p. 30) (corsivo mio).

Stabiliti questi due assiomi, Stenone ne deriva la sua concezione orogenetica: “il mutamento di posizione degli strati è [causa dell’] origine dei monti” (p. 32), ma lo sono anche “l’eruzione di fiamme, [...] e per l’impeto di piogge e torrenti” (p. 33), in cui paiono mescolarsi intuizioni tettoniche, ignee, e geomorfologiche. In realtà, Stenone motiva il cambiamento della posizione degli strati essenzialmente per collasso o “scivolamento degli strati inferiori” (p. 36), generato da erosione, in un contesto cinematico passivo, per pura gravità. Netta e decisa è l’opposizione alla concezione fissista, peraltro non banale, del *Mundus Subterraneus* di Kircher (in cui ci sono catene montuose orientate sui meridiani e altre sui paralleli sin dagli inizi del Creato) [8].

Contestualmente, si trovano evidenti, se pur involontarie, formulazioni del Principio dell’Attualismo di Lyell (*the present is the key to the past*) nei punti 3., 4., 5. (pp. 28, 29):

3. Se in un certo strato noteremo tracce di sale marino, resti di animali marini, tavole di navi e una materia simile al fondo marino, è sicuro che in quel luogo una volta è esistito il mare, in qualsiasi modo sia effettivamente giunto lì, o per proprio straripamento, o per innalzamento di monti (p. 28).

La formulazione più letterale e aderente al futuro modello canonico lyelliano, sempre inconscia direi, si trova più avanti:

In che modo lo *stato presente* di una certa cosa svela lo *stato passato* della medesima cosa, oltre al resto lo mostra chiaramente con il proprio esempio la Toscana, nella cui facies odierne le disuguaglianze che si incontrano contengono in sé tracce palesi di diversi cambiamenti (p. 67, corsivi miei).

Non ci si deve sorprendere perché formulazioni ancora più esplicite dell’Attualismo si trovano già per esempio in Aldrovandi e in Colonna [27], [3].

La conversione geologica di Steno non ne modifica il metodo anatomico d’indagine. Egli continua sempre a fare l’anatomia non solo col bisturi sui corpi organici, ma ora con gli occhi anche su quelli geologici, sia in superficie nelle pareti dove appaiono “strati spezzati” (p. 32), che “in moltissime caverne” del sottosuolo (p. 34). Lo stesso vale quando parla della crescita delle conchiglie (p. 57).

Due sono i riferimenti temporali occasionali alla durata del tempo della Terra. Il primo afferma “l’acqua trattenuta in quel modo non evapora neppure in tutti i secoli a venire” (p. 38). Ne deriva che l’ordine di grandezza del futuro della Terra per Stenone sono “i secoli”, neanche i

“*secula seculorum*” della tradizionale dizione biblica per indicare i tempi più lunghi. Il secondo riferimento è più elaborato, ma ha esito analogo:

Vi sono di quelli cui la lunga durata del tempo sembra annientare il vigore degli argomenti restanti, non essendo nota a memoria di nessuna generazione che le inondazioni si siano innalzate fino al punto dove oggi si ritrovano molti corpi marini, se si escluderà il diluvio universale, a partire dai quali fino ai nostri tempi si contano approssimativamente quattromila anni; né pare in buona armonia con la ragione che parte di un corpo animale abbia resistito alle ingiurie di così tanti anni, quando constatiamo spesso che nel tratto di pochi anni quegli stessi corpi si disfano totalmente (pp. 62, 63).

Qui Stenone pecca anche per carenza di osservazioni e eccessiva fiducia nella sua ragione. E, ai nostri fini, confessa candidamente che i suoi “così tanti anni” non alludono al tempo profondo dei geologi ma ancora e sempre ai 4000 anni biblici, anche in accezione scientifica.

Per una mente critica come la sua non ci si aspetterebbe di trovare una certa dose di ingenuità come in: “2. È sicuro che sono esistiti un tempo uomini di grandezza mostruosa” (p. 62) (neppure la *Mostrorum historia* di Aldrovandi si avventura in simili affermazioni, proprio perché ha intenti solo scientifici [27], [31]); oppure prendere per elefanti di Annibale le grandi ossa scavate nell’Aretino (p. 64), quando paradossalmente invece Stenone arguisce che là si trovano “crani di bestie che non provengono da animali di queste latitudini” (p. 64).

Poco dopo si arriva alla parte più originale e innovativa del *Prodromus*. “In ordine inverso” (antistratigrafico si noti bene, ma scelto forse per la sua maggior efficacia nei lettori non geologi), e in serrata e lineare successione. È accompagnata da un modello grafico di sorprendente sintesi e modernità, che non ha più nulla di barocco. In esso Stenone descrive, quasi diagnostica, le sei facies della storia geologica della Toscana, già introdotte a p. 6 col termine di “stati”. Poi, come per attutire il *lapsus* volontario proiettato nel futuro, adotta il criterio d’ordine stratigrafico corretto, secondo quelle che sono poi diventate convenzioni stratigrafiche, cioè l’ordine dal basso (antico) in alto (recente), nella corposa didascalia delle figure dopo p. 76. Qui, infatti, l’elenco comincia dalla facies più bassa e antica. Stenone è forse uno dei primi a impostare l’analisi storica di una regione da un punto di vista geologico, vedendovi una sequenza temporale [32].

Su questo punto dell’introduzione del termine latino *facies*, cioè faccia o aspetto, Stenone non teme subalternità, involontaria, a Leonardo. “Omo senza lettere” (fino a un certo punto), Leonardo non vanta pretese linguistiche. Stenone usa il termine *facies* in una accezione assai più generale di quanto lo usano oggi i geologi. Il suo è un uso pienamente geologico che ingloba anche aspetti tettonici. Noi invece lo usiamo in accezioni prevalentemente stratigrafiche sedimentarie (ma non dimentichiamo le *petrofacies* e simili). Ci si potrebbe chiedere se Gressly che ha ridato nuovo impulso all’uso del termine *facies* in stratigrafia nel 1838 conoscesse l’uso che ne aveva fatto Stenone [33].

Il modello evolutivo di Stenone appare schematico, astratto, idealizzato, concepito sulla base di faticose supposizioni, privo dell’ardire di riuscire a rappresentare la realtà [13] ma evidentemente ispirato ai fatti esposti nel paesaggio toscano e ben visti dai suoi occhi.

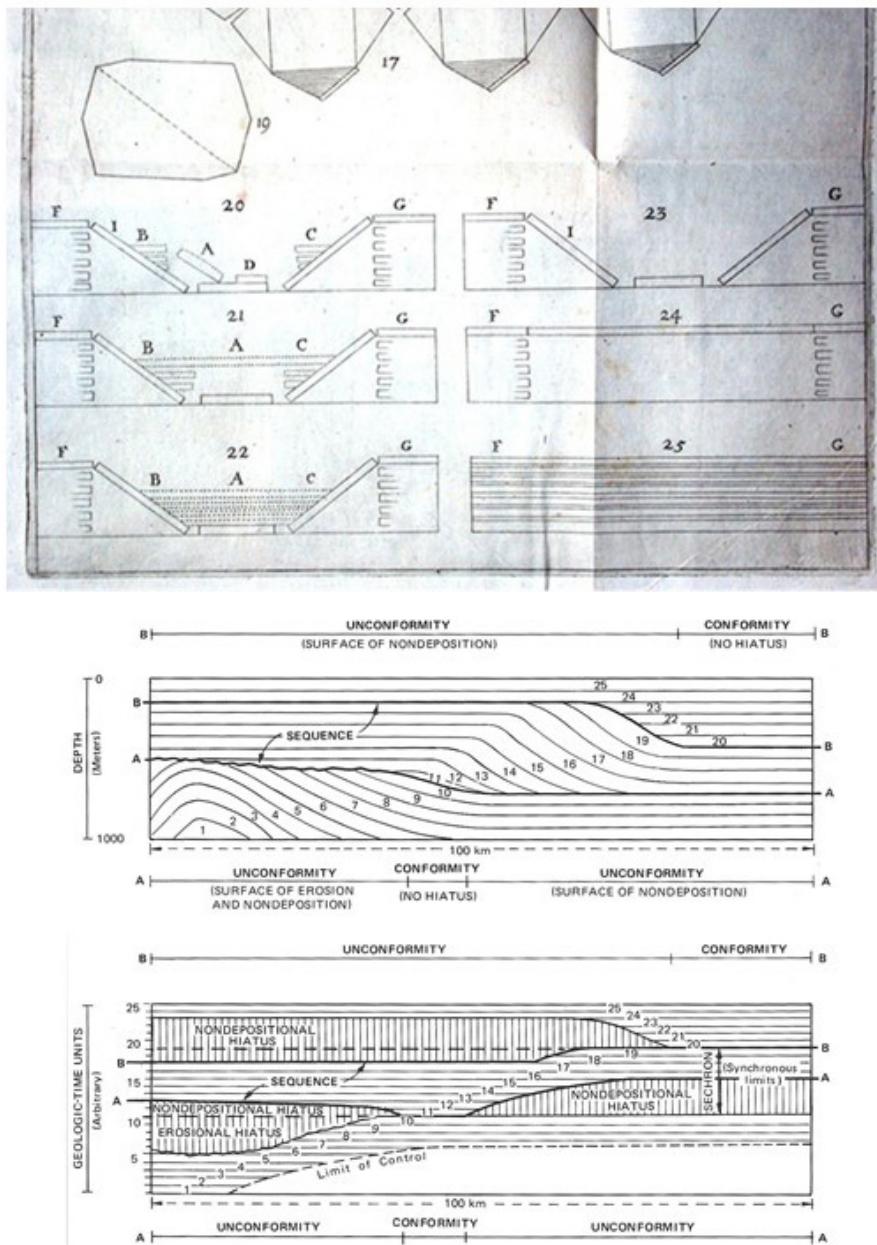


Fig. 2. Modello evolutivo o schema di stadi successivi di cambiamento nella storia geologica della Toscana (Stenone *Prodromus* 1669) (in alto; è riportata solo la parte pertinente della tavola originale). Modello geometrico di sequenza stratigrafica ideale, rappresentata in diagramma spazio/spazio (sopra) e spazio/tempo (sotto) (da Vail, P.R. *Bulletin AAPG.*, Memoir 26, 1977, 49-212) (in basso).

La figura-modello composita (25-20) non si limita a fare la storia geologica della Toscana trovando nel suo “stato presente” “le tracce palese” “dello stato passato”, “oltre al resto”. E il resto è costituito dai principi già enunciati a parole, che diventano intuitivi nella nitida e ordi-

nata rappresentazione geometrica [34], altamente speculativa ma didattica (Fig. 2, in alto). Non posso fare a meno di vedere in questo diagramma di Stenone l'icona o prototipo grafico e concettuale dell'intero sistema della Stratigrafia Sequenziale moderna dei petrolieri americani [35], che non mi pare si siano ricordati di citare il modello (Fig. 2, in basso). Una pura convergenza indipendente e casuale sarebbe poco credibile. Questo che oggi è anche il miglior strumento di correlazione cronologica nella geologia dei sedimenti stratificati, ci dice quale sia stato il ruolo di Stenone nel formulare il concetto di tempo geologico, nonostante il suo errore nel valutarne la durata.

Da questo mirabile capitulo finale del *Prodromus* deriva una geologia stenoniana [3], [36] decisamente mobilista e intrinsecamente evolutiva, formulata in modo esemplare, quasi come assioma: “è certamente incessante il cambiamento delle cose naturali e non vi è d'altra parte alcuna riduzione al nulla” (p. 71). Vale ricordare che Stenone, educato alla diuturna lettura della Bibbia, ravvisava e rispecchiava una tale visione scientifica della natura anche nel sublime deutero Isaia (es. 43, 16-21). Non ci sono invece indicazioni per vedervi una evoluzione paleontologica, neppure nella distinzione stenoniana fra strati fossiliferi e strati azoici, vedi tavola 1 in [20]. La stessa distinzione di “strati rocciosi” da un lato, e di “strati delle colline arenacee” e dei “colli sabbiosi” dall'altro (p. 45), sia in testo che nella didascalia, ha solo un significato stratigrafico temporale.

Resta il fatto che questa di Stenone è la prima sintetica ricostruzione stampata per studi evolutivi (“diversi cambiamenti”) della stratigrafia, dei paleoambienti e della paleogeografia di una regione ben delimitata, “spazio compreso fra Arno e Tevere” (p. 76). È indubbio che prevalga l'aspetto geomorfologico e di geologia esogena. Ma anche la geologia endogena viene coinvolta seppur in forma di sola tectonica di collasso e crollo, ispirata da Cartesio.

Nella ricostruzione sono inserite alcune affermazioni, fondate o infondate, meritevoli comunque di sottolineatura. Come quella per cui “gli strati dei monti più alti privi di ogni corpo eterogeneo” “dimostrano chiaramente che nell'epoca [...] non si trovavano ancora né animali né piante” (p. 69).

Qui è di particolare importanza la formulazione del Principio di Sovrapposizione, applicato sia a strati singoli che a gruppi di strati:

sono stati depositi nuovi strati da un altro fluido al di sopra degli strati del primo fluido, la materia dei quali ha potuto colmare di nuovo allo stesso modo le rovine degli strati abbandonati dal primo fluido; cosicché appunto bisogna sempre far ricorso al fatto che, nel tempo in cui prendevano forma quegli strati di materia pura ed esposti in tutti i monti, gli altri strati non esistevano ancora, ma tutto era coperto da un fluido privo di piante e di animali e di altri solidi (p. 70).

Tale formulazione viene poi graficamente espressa nell'icona del modello evolutivo di Fig. 2 (in alto). E nella didascalia della tavola vengono espressi ancor più chiaramente due concetti basilari della geologia quali trasgressione e regressione spaziale della linea di costa e verticale del livello del mare: “la Toscana [...] è stata due volte fluida, due volte piana e asciutta” (pp. 68, 69).

2.2. Passiamo a sintetizzare ora la geologia di Leonardo (1452-1519)

Se si pensa a lui, qualche relazione fra pittura e geologia sembrerebbe ovvia. Non a caso Leonardo da Vinci a partire dagli inizi dell'Ottocento è ritenuto uno dei padri fondatori della geologia moderna [24], [37]. Che ci sia invece una sorta di relazione genetica fra la riscoperta della prospettiva geometrica, ben espressa soprattutto nella pittura dell'Umanesimo, e la nascita della geologia, sorprenderà forse molti lettori e anche qualche specialista. Eppure, quest'idea è ben fondata e anche non recentissima [38]-[40]. Non unico fra gli artisti del Rinascimento, Leonardo è stato inarrivabile nel fornirci nei suoi fogli manoscritti un precoce trattato illustrato di ciò che noi chiamiamo oggi scienze geologiche [9]-[13]. E lo fa, come dopo di lui Aldrovandi e Stenone, sempre partendo dalla sua "sperienza" piuttosto "che dall'altrui parola"⁴.

Leonardo nel primo Rinascimento aveva già formulato i principi generali della geologia studiando Toscana, Appennino Romagnolo, Pianura Padana, Alpi Lombarde e Venete, che si sarebbero confermate come aree tipo dello sviluppo della geologia nei secoli successivi⁵. Egli scrive di strati, della loro orizzontalità originale, continuità originale, sovrapposizione, inclinazione successiva e conseguente inconformità o discordanza angolare. Vediamone qualche documento per cui mi rifarò a quanto scrisse in un volume stampato nel 1986, ma mai distribuito per fallimento della casa editrice. La fonte primaria è il Codice Leicester, scritto intorno al 1506-1510:

e il segnio di ciò si vede dove per antico li monti Appennini versavano li lor fiumi nel mare Adriatico, li quali in gran numero mostrano infrali monti gran somma di nichi insieme coll'azzurrigno terren di mare (9A, 9r)

le radici settantrionali di qualunque alpe non sono ancora petrificate; e questo si vede manifestamente dove i fiumi, che le tagliano, corrano inverso settantrione, le quali taglian nell'altezza de' monti le falde delle pietre vive; nel congiungersi colle pianure le predette falde son tutte di terra da fare boccali, come si dimostrano, in Val di Lamona, fare al fiume Lamona nell'uscire del monte Appenino, far lì le predette cose nelle sue rive (10A, 10r)

Li suoli, o ver falde delle pietre, non passano troppo sotto le radici de' monti, ch'elle son di terra da far vasi, piena di nichi; e ancora queste vanno poco sotto, che si trova la terra comune, come si vede ne' fiumi che scorron la Marca e la Romagna, usciti dellli monti Appennini (1B, 36r)

Leonardo, di nuovo "omo senza lettere", non è facile a leggersi. Va trascritto, semplificato e interpretato, ricordando che l'iterazione dei suoi periodi fa parte del suo metodo sperimentale: riformulare cioè il concetto in base alle varianti di ogni caso analogo (le sezioni trasversali naturali degli strati visibili lungo le valli di Marche e Romagna). L'ultimo brano si può trascrivere e spiegare geologicamente come segue (i corsivi sono miei): "Lungo le valli che attraversano le Marche e la Romagna, uscendo dai monti Appennini, si vedono i *veri strati litoidi* che, non

⁴ Codice Atlantico f. 327v già 119v:a, ma anche f. 597br già 221v:d, intorno al 1503.

⁵ La sterminata letteratura su Leonardo scienziato si va arricchendo anche in Italia col quinto centenario [41], [42] (v. anche [9]-[17]).

proseguendo troppo sotto [oltre, scendendo la valle e sotto, più in basso di prima] il piede dei monti, sono [sostituiti da altri strati e] fatti di *terra da far vasi* [argilla malleabile per ceramica], piena di nichi [conchiglie]; e questi proseguono ancora poco sotto [oltre], dove [sono sostituiti da e] si trova *terra comune* [terreno agrario del fondovalle], come si vede nei fiumi [...].

Se fondiamo gli ultimi due brani, che sono omologhi, appare chiaro che Leonardo riconosce e distingue tre unità stratigrafiche, noi diremmo formazioni, che ogni geologo incontra scendendo lungo le valli di Romagna: 1) le “*falde [strati] delle pietre vive*” o “*li suoli o ver falde delle pietre*” (= Formazioni Marnosa Arenacea e Gessosa Solfifera), 2) “*le falde di terra da fare vasi di azzurrigno terren di mare pieno di nichi*” (= Formazione Argille Azzurre), 3) “*la terra comune*” (= alluvioni fluviali pedemontane) (Fig. 3). E in altro foglio dello stesso Codice ribadisce “*de nichi in fango azzurreggiante*” (f. 8B).

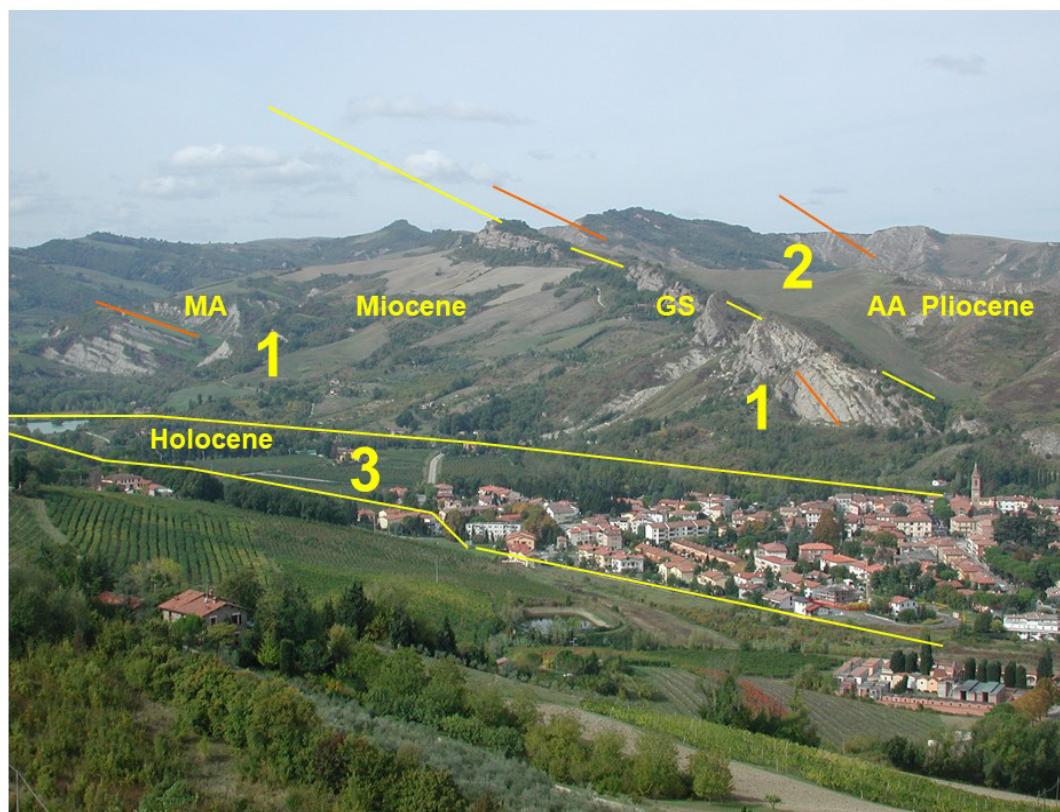


Fig. 3. Sezione stratigrafica naturale 3D del tratto centrale della Val Santerno a Borgo Tossignano, Appennino Romagnolo, con sovrapposto lo schizzo desunto dalla descrizione che Leonardo fa nello scendere la parallela e geologicamente equivalente Val Lamone nel Codice Leicester. Legenda: vedi testo per la spiegazione; 1. Formazione Marnoso Arenacea MA, e Formazione Gessoso Solfifera GS, 2. Formazione Argille Azzurre AA, 3. Alluvioni fluviali pedemontane; limiti fra formazioni in giallo; stratificazione in arancio.

Fatto assai importante, Leonardo scendendo le valli ha eseguito mentalmente la scansione 3D degli strati e dei loro tre raggruppamenti sulla base del loro assetto geometrico (direzione e immersione degli strati nello spazio) (Fig. 3). Esprime cioè il concetto che le tre unità sono

sovraposte nello stesso ordine dal basso verso l'alto, e che le prime due compaiono una in successione all'altra lungo i fondovalle per effetto della immersione dei loro strati verso la pianura (o “inverso settantrione”), mentre la terza unità compare per ultima e non si immerge sotto nulla, ma evidentemente ricopre e nasconde le altre due. Le alluvioni allora sono orizzontali, come i depositi dei fiumi, e tagliano in maniera discordante gli strati inclinati, come Leonardo vedeva lungo i fiumi toscani e romagnoli, quando a cavallo andava da Firenze a Imola, Faenza, e Cesenatico. E lo stesso vedono oggi i geologi scendendo lungo le stesse valli.

Leonardo cita espressamente la “Val di Lamona”, in cui, come noi oggi, ha descritto una monoclinale di strati immersi verso la pianura e rivestiti dalle alluvioni nei fondovalle romagnoli e in pianura (Fig. 3).

Questa è una formulazione operativa del Principio di Sovrapposizione Stratigrafica già a livello di gruppi di strati, qui assai più elaborato e concreto rispetto a quello schematico e astratto di Stenone. E il concetto di discordanza angolare fra pacchi di strati traspare già evidente, come lo sarà in alcuni strabilianti sezioni geologiche sottomarine di Luigi F. Marsili (1658-1730), prima della formulazione scritta di James Hutton a fine Settecento.

Chi arricci il naso per presunto eccesso interpretativo, consideri spassionatamente il prossimo brano:

Come li fumi an tutti segati e divisi li membri della grand'alpe l'un dall'altro; e questo si manifesta per lo ordine delle pietre faldate, che, dalla sommità del monte insino al fume, si vede la corrispondenza delle essere così l'un de' lati del fume, come dall'altro. Come le pietre faldate de' monti son tutte è gravi de fanghi *posati l'un sopra l'altro* per le inondazioni de' fumi (10A, 10r) (corsivo mio).

in cui sia il Principio di Continuità Laterale degli Strati che quello di Sovrapposizione Stratigrafica sono letteralmente enunciati nella stessa modalità descrittiva e interpretativa di Stenone. Vien quasi il dubbio che Stenone abbia potuto orecchiare almeno alcuni di questi concetti leonardeschi, trasmessi come tradizione verbale dalla cerchia dei suoi amici e collaboratori a Firenze [20], [22] dove peraltro Stenone ha certamente visitato la Galleria degli Uffizi e quindi il *Battesimo*, di cui si parla subito sotto.

Ciò che sembrerebbe mancare a Leonardo, almeno in questi brani, è di fare l'equazione spazio-temporale esplicita rispetto a Stenone, che cioè gli strati inferiori sono più antichi ([9], p. 44). Prima di proseguire con passi manoscritti, andiamo a ricercare informazioni in qualche quadro e disegno di Leonardo.

Nel *Battesimo* del Verrocchio e altri artisti della bottega (Fig. 4) il giovanissimo Leonardo compone l'angelo di sinistra e parte dei fondali dal 1470 al 1480 [11]. Qualcuno di recente si è arrischiato ad asserire che i ciottoli del torrente ai piedi dell'angelo non sarebbero di Leonardo perché mal abbozzati. Costui non si è accorto che lo stesso tema è ripetuto in altra opera matura, la *S. Anna* del Louvre (1506-1510), e che ricorre ripetutamente nei codici di Leonardo, come icona della dinamica ‘acqua e pietre’. Ho già spiegato come non si possano fare attribuzioni solo sulla base della tecnica usata, specialmente per Leonardo che, purtroppo per noi, non disdegnavo certo di sperimentare tecniche nuove [11], o nuovi stili. Certe parti dei due quadri

suddetti sono dei piccoli trattati grafici sulla formazione dei ciottoli fluviali⁶, ma anche sulla fluido dinamica delle particelle sabbiose, limose e argillose trasportate dai fiumi entro il mare (cioè il contenuto dei fluidi torbidi generatori degli strati di Stenone).



Fig. 4. Genesi graduale dei ciottoli fluviali nel *Battesimo* di [Verrocchio], Leonardo (1470-1480), [et al.], Firenze, Uffizi (foto Vai 2001) (sopra), e nella *S. Anna* di Leonardo (1506-1510), al di sotto degli strati a esili lamine sabbiose, Parigi, Louvre (foto Vai 2000) (sotto).

Molti passi anche nel solo Codice Leicester attestano il livello di comprensione che Leonardo aveva raggiunto su argomenti quali l'alterazione superficiale, il trasporto solido, la sedimentazione e la litificazione. Ne cito solo alcuni [43]:

Ne' principi de' fiumi son le gran pietre. Nel quarto del fiume son le ghiae. Nel mezzo del corso del fiume son le rene. Nell'ultimo del fiume si troverà il fango (18A, 19v).

Il fiume, che esce de' monti, pone gran quantità di sassi grossi nel suo ghiareto, i quali sono ancora con parte de' sua angoli e lati [ecco la ragione per cui Leonardo ha rappresentato la formazione dei ciottoli anche *in situ* prima di farli ulteriormente arrotondare nei fiumi]; e nel

⁶ Ben descritta anche nei manoscritti, come nel caso dell'arrotondamento dei ciottoli “La confregazione de' sassi l'un coll'altro nelli corsi fatti dalli fiumi consumano li angoli delle pietre” (Codice Atlantico f. 433r ex 160v.a).

processo del corso conduce pietre minori con angoli più consumati, cioè, le gran pietre fa minori. E più oltre pon ghiaia grossa, e po' minuta; di poi procede lita grossa e poi più sottile; e, così seguendo, giugne al mare l'acqua turba di rena e di lita: la rena scarica sopra de' liti marini pel rictramento dell'onde saline, e segue la lita di tanta sottilità, che par di natura d'acqua. La qual non si ferma sopra de' marin liti, ma ritorna indirieto coll'onda, per la sua levità, perché nata di foglie marce e d'altre cose lievissime, si che, essendo quasi, com'è detto, di natura d'acqua, essa poi, in tempo di bonaccia, si scarica e si ferma sopra del fondo del mare, ove, per la sua sottilità, si condensa e resiste all'onde, che sopra vi passano, per la sua lubricità (6B, 6v).

Di poi che 'l mare si discostò dalli predetti monti, la salsedine lasciata dal mare, con altro omore della terra, ha fatto una collegatione a essa ghiara e rena, che la ghiara in sasso e la rena in tufo s'è convertita (6A, 31v).

Il fiume muta più spesso il letto ne' lochi piani e di tardo corso che ne' monti e di veloce corso; e questo accade perché la materia dal fiume nel piano, perché in tal loco li manca l'impeto e si scarica (18A, 19v).

Se non si parte da questi (e altri simili) passi, è difficile individuare chi abbia dipinto i ciottoli del *Battesimo* e capire la somiglianza ma anche la differenza che ci sono nella geologia dei due dipinti discussi. In essi la teoria leonardesca della nascita e sviluppo dei ciottoli è rappresentata in maniera identica, secondo la falsariga del brano riportato sopra (6B, 6v) [11].

La maturazione avvenuta nella mente di Leonardo si manifesta ancor più in una struttura sedimentaria nel basamento della *S. Anna* (Fig. 4, sotto) dove ho potuto riconoscere uno strato arenaceo con finissime lamine sabbiose ondulate, tipiche delle rocce più comuni in Toscana e Romagna: le torbiditi. Sono rocce derivate dal deposito in fondo al mare di correnti cariche di materiale torbido portato da grandi piene fluviali⁷ (di nuovo un concetto ben presente nel *Prodromus*). Fatto ancor più significativo, le torbiditi, per la moderna geologia, sono state scoperte, descritte e interpretate, ufficialmente, a metà Novecento, ancora in Toscana, da C. Migliorini e P. Kuenen, a dimostrazione di una loro discendenza genetica stenoniana e, prima, leonardesca. Se pensiamo al livello di intuizione, osservazioni e competenza raggiunto da Leonardo sulla meccanica dei fluidi, il moto ondoso, l'origine dei vortici e i processi all'interfaccia sedimento/acqua e acqua/aria, non sorprende che avesse osservato e capito anche il meccanismo deposizionale delle torbiditi [11], [12].

Questo processo si collega a quello rappresentato in un disegno del Codice Arundel [10], dove Leonardo teorizza il meccanismo di formazione delle increspature visibili nelle dune ventose o nei fondali sabbiosi sottoposti al moto ondoso o alla corrente, al contatto aria/acqua/sedimenti granulari, o addirittura nei treni di nuvole del bel tempo al contatto vapore/aria asciutta. È questo meccanismo che ha formato quelle lamine sottilissime filiformi, in sezione, quasi fosse-

⁷ Codice Leicester, f. 8B, "...le piene d'Arno torbido in quel mare versava".

ro capelli, con le dolci ondulazioni, che si ripetono e si rifrangono le une nelle altre, nello strato marroncino di Fig. 4 (sotto), prima che le lamine di sabbia si litificassero a produrre uno strato.

Gli stessi riccioli, inimitabili, li troviamo nei capelli dell'angelo del *Battesimo* o in quelli della *Ginevra de' Benci* (~1474) (Fig. 5) o nella famosa *Mappa di Imola* (1502), dove riman-dano e si trasformano nei meandri del Fiume Santerno, studiati come tema aggiuntivo ma inte-grato nel tema della mappa.

Sarà opportuno qui ribadire che uno dei fascini più sottili e misteriosi della pittura di Leo-nardo è la poetica della scienza [11], [14]. Misterioso perché l'osservatore deve essere prepara-to scientificamente e tecnicamente per poter leggere e vedere ciò che Leonardo, con anticipo se-colare, aveva già capito, dipinto e 'nascosto' ai contemporanei, e lasciato in eredità all'intelletto cumulativo dell'umanità in un futuro di durata ancora indefinibile. E il mistero non disdegna la rappresentazione realistica del naturale, che non ha proprio nulla di fotografico in quanto si concretizza solo quando l'artista scienziato ha capito il processo e lo vuole raffigurare nel gran libro pregnante delle sue opere artistiche.

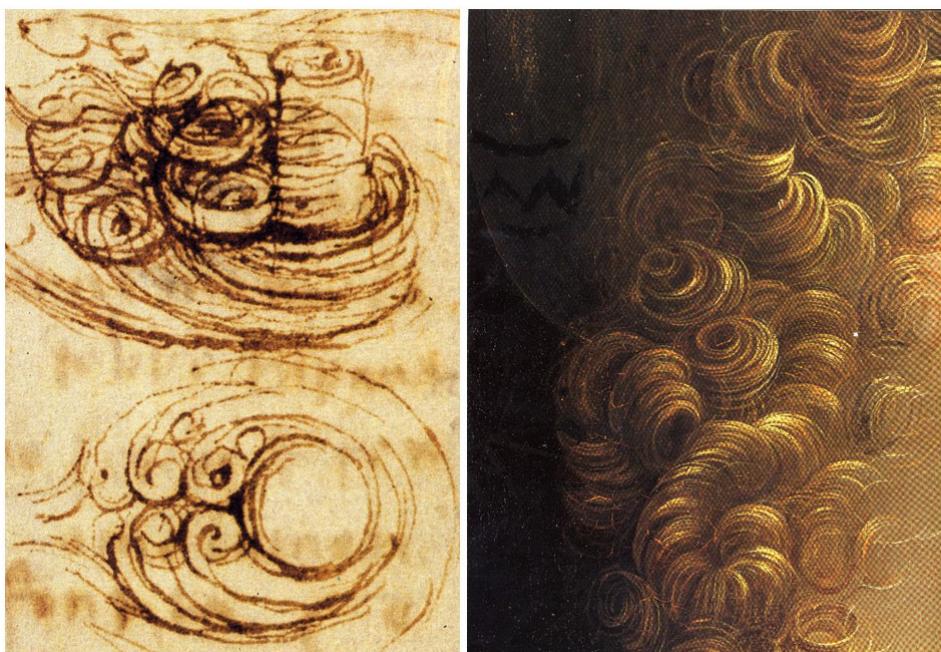


Fig. 5. Vortici elicoidali di un fluido sul lato sottovento di un ostacolo fisso in vista laterale e verticale con flusso da destra a sinistra (Leonardo Codice Leicester 15B 22r) (a sinistra). Particolare dal *Ritratto di Ginevra de' Benci* di Leonardo (~1474) con riccioli in spirali 3D (a destra).

3. Il Diluvio

Stenone è in buona compagnia con chi vede nel Diluvio la causa dei fossili nelle montagne, tema ovvio per tanti naturalisti della Riforma luterana [5], [22], [27], [44]. Nondimeno, l'im-portanza che dà al Diluvio è l'unico aspetto debole della sua opera geologica, nel quadro di un

uso inappuntabile, anzi ammirabile che lui fa della ragione e dell'esperienza, libere da influssi esterni. Naturalmente faccio la valutazione applicando i criteri di giudizio, la mentalità, i principi, le conoscenze e le teorie del tempo, e non quelli di oggi.

La questione dei fossili marini che si trovano sui monti può essere schematizzata nelle seguenti fasi [3]:

- 1) I presocratici, ripresi da Erodoto, pensano che i fossili siano resti pietrificati di animali ex-vivi.
- 2) Aristotele, Plinio, Lucrezio, Seneca, Isidoro, Beda considerano alcuni fossili come pietre speciali o corpi inorganici utili nella farmacopea.
- 3) Il dualismo interpretativo (organico o inorganico) si rafforza nel Medioevo (Ristoro d'Arezzo)
- 4) Leonardo ammette solo l'origine organica, ridicolizzando i presunti rapporti col Diluvio biblico, che peraltro non mette in discussione sul piano storico, anzi utilizza come testimone della contraddizione insanabile di chi lo invoca. Diversamente da Stenone e più che Aldrovandi, Leonardo contesta il ruolo geologico del Diluvio, anticipando e risolvendo un dibattito filosofico scientifico che in Europa si protrarrà per tre secoli. Purtroppo i manoscritti di Leonardo rimasero sconosciuti fino alla fine del Settecento [45]. Ma forse qualcuno ne ebbe sentore, come Girolamo Fracastoro (1485-1553) che si limita a usare argomenti antidiluviani quasi identici [12], [20], [22].

4. Il tempo geologico

In geologia bisogna distinguere il tempo dei processi ciclici (come nascita e morte delle catene montuose), da quello dei processi lineari (come l'evoluzione biologica). Per misurare il tempo occorre disporre di una scala relativa ordinale (primo, secondo ecc.) oppure di una scala assoluta cardinale o numerica. Fino a circa due secoli fa anche il tempo geologico si misurava in anni, secoli, millenni e “secoli di secoli”, cioè non oltre circa 10.000 anni, in analogia con il tempo storico. Da fine Seicento/inizi Settecento il tempo geologico si misura in decine e centinaia di migliaia di anni, dall'Ottocento in milioni fino a centinaia di milioni di anni, e dal Novecento in miliardi di anni. Questa è stata forse la maggiore rivoluzione conoscitiva della storia umana, ancora poco digerita. Ne sono stati artefici i geologi, seguiti poi dai fisici, non dopo vistosi errori, come quello clamoroso di Lord Kelvin che voleva porre limiti ai geologi, per essere poi smentito postumo da più giovani colleghi fisici.

In passato Aristotele parlava di eternalismo punteggiato da ciclicità, senza quindi la possibilità di estrarre una storia della Terra. Lucrezio invece postulava un universo eterno esistente “da tempo infinito” e un mondo caduco durato solo “*multos per annos*”. Agostino, da par suo, prima evidenziava la contraddizione tra tempo e eternità, “Vorrebbero conoscere l'eterno, ma la loro mente volteggia ancora vanamente nel flusso del passato e del futuro” (*Confessioni*, 11, 11. 13), poi adombra il concetto di “innumerevoli secoli” riferendosi alla storia della creazione “del cielo e della Terra” (*Confessioni*, 11, 13. 15).

In realtà, esclusi solitari pensatori, prima della scienza moderna, l'età della Terra era quella misurata dalle cronologie biblica e delle altre grandi civiltà, come quella cinese, cioè non più di alcune migliaia di anni. Come battuta, si può dire che anche il tempo infinito degli eternalisti non è mai stato altro che indefinito, ma certamente lungo.

Neanche Hutton misurava numericamente il tempo della Terra, ma lo riteneva almeno più lungo di quanto lo avesse stimato Buffon (75.000 anni) che citava; e i suoi interpreti (Lyell *in primis*) assegnavano alla Terra un'età di centinaia di milioni di anni.

Chi ha ispirato Buffon a fare quel primo gran salto? Ben prima di Réaumur [44] furono il modenese Grandi e il veronese Bianchini [4]. Essi aprirono la strada a De Brosses e Buffon a riscontrare che sotto gli strati e le lave del diluvio ci sono ancora tanti altri strati e lave che indicano non poche migliaia bensì molte decine di migliaia di anni. Così anche questa scoperta ha matrice italica, risonanza francese, e formalizzazione filosofica nell'ultima teoria della Terra, quella di Hutton. La scoperta della radioattività (Curie) e la sua applicazione (Rutherford) pro-durranno la conferma e l'ultimo, incredibile salto miliardario.

Gli stessi geologi ne rimasero sorpresi, quasi spiazzati, soprattutto quelli più dediti alla geomorfologia e alla geologia del sedimentario e dei processi rapidi e catastrofici, che sono anche oggetto primo della ricerca stenoniana. Per non parlare dell'uomo comune, anche acculturato, ma privo di memoria del passato, per cui i milioni di anni dei geologi ricordano, purtroppo, le favole e fanno sorridere.

Stenone quindi ha concepito la sua geologia nel quadro cronologico del ‘buon senso’, sia popolare che colto, in concordanza con la cronologia biblica e con quella secolare. Se aveva un problemino nel fare ciò, non riguardava il tempo breve a disposizione, ma semmai quello troppo lungo [46], visto il poco tempo che occorreva alle conchiglie per andare in frantumi (diversamente da Marsili, Steno si basava sulle sole esperienze di sedimentazione costiera). Quando nel *Prodromus* (p. 7) riporta le opinioni degli antichi autori si limita a una frase “*nescio quam immemorabilem annorum seriem*”, coerente con le cronologie biblica e secolare. E, pur avendo dato un'età numerica minima ai soli strati diluviani (< 4000 anni) [46], evidentemente assegnava agli strati precedenti l'età della Creazione, stimata intorno al 4000 a.C. Quanto di opposto scritto su questo tema in un recente libro italiano, nonostante l'apparente autorevolezza della sede, è da ritenere pura fantasia [47].

Certo, chi ammiri le scoperte geologiche di Stenone potrà restare deluso che egli sia rimasto appiattito nella cronologia breve del suo tempo. Ma chi ha fatto meglio di lui nei suoi tempi? Pochi, pochissimi, e ancora sempre primo, forse il solo inimitabile Leonardo, che non fa regola, ed è entrato nella storia della scienza solo a fine Settecento [45].

Per capire il motivo di questa che è la principale debolezza di Stenone, legata a doppio filo al suo diluvianismo, bisogna ritornare a Nicoletta Morello (1946-2006). È lei ad attribuire a Stenone l'*ipotesi della formazione sedimentaria della crosta terrestre* ([4], p. 251) che sta alla base della stratigrafia e dei relativi principi di orizzontalità e sovrapposizione iniziali. Certo, lo storico della geologia è colpito nel vedere quante volte nel *De solido* Stenone scriva la parola “*strato*”, ma ancor di più da Leonardo che scrive di “*falde*” di rocce e di terre. Anche Alberti nel 1452 e Agricola nel 1556 scrivono di strati, come pure Bartholin, Boccone e Buonamico, ben noti a Stenone; ma nessuno di loro ne parla con la competenza e l'originalità di Stenone.

Quanto a Cartesio, teorizza una struttura a strati della crosta terrestre nei *Principia* (1644) ([4], p. 252), [48]. Peccato che ogni suo strato sia pervio e consenta il passaggio delle particelle che li costituiscono in ogni tempo.

Secondo Morello, la deposizione meccanica di materiali in sospensione in un fluido distribuito su tutta la superficie terrestre (un oceano primario e poi il Diluvio Universale) spiega la natura sedimentaria di quelle rocce [le più frequenti in superficie], l'orizzontalità degli strati, e induce “a ipotizzare la lentezza del fenomeno (dimostrata anche dalla tipologia dell’ammasso dei fossili)”. È questo l’unico labile accenno che ho trovato in letteratura che potrebbe far sospettare anche in Stenone una cronologia della Terra più estesa di quella biblica, ma oggettivamente non c’è prova arguibile. Sempre Morello continua dicendo che, diversamente da Cartesio, ogni strato si forma a un tempo definito, sovrapponendosi sopra il precedente già consolidato (e quindi non pervio). La sovrapposizione fornisce uno strumento di cronologia relativa che potrà utilizzare anche i resti degli organismi viventi nel fluido. Stenone bipartisce la successione degli strati in *prediluviali* o originari (di natura *saxea* e più antichi) e *postdiluviali* (di natura *arenacea* e più recenti). I primi sono azoici (e questo è uno degli errori sperimentalisti di Stenone), i secondi contengono fossili.

Con Marsili, Lehmann, Moro e soprattutto Arduino si cominciano ad abbozzare storie geologiche locali o tematiche più elaborate e complesse di quella della Toscana di Stenone, col tentativo di arrivare a scale stratigrafiche e cronologiche di valore sovra regionale o addirittura generale [21], [23], [49].

Evidentemente la lezione stenoniana non riguarda tanto il Diluvio, quanto la geologia sedimentaria, l’orizzontalità, la continuità, la discordanza (seppur non enfatizzata) e i fossili come indicatori di ambiente. Per Stenone i fossili erano anche indicatori postdiluviali, che gli consentivano quindi di fare una assai schematica storia geologica della Toscana, divisa in due tappe appunto, prediluviale ‘azoica’ e postdiluviale fossilifera. Pur se errata, era utile come procedura iniziale.

Anche sotto questo aspetto Leonardo era arrivato prima di Stenone e non aveva commesso alcun errore. Applicava uno schema duale e distingueva due intervalli di tempo, il primo costituito da *rocce litoidi* o “*falde*” (il termine che egli usa per indicare gli strati di Stenone) poste sotto e più antiche, e il secondo da “*terre*” (incoerenti) che sono sempre sovrapposte alle prime e più recenti [10], ([21], pp. 83, 90).

Leonardo e Stenone rimangono quindi appaiati nella bipartizione della scala proto stratigrafica relativa del tempo geologico, ma radicalmente diversi nel criterio di suddivisione, che per Leonardo è la litificazione e per Stenone il Diluvio.

Ma c’era differenza fra i due sulla durata del tempo geologico? Non mi ha mai sfiorato il dubbio che Stenone possa aver anche solo immaginato una cronologia della Terra diversa da quella biblica dominante ai suoi tempi, se non ubiquitaria nel mondo occidentale, dei vari Genebrardo (1567), Lightfoot (1654), e Husser (1650 e 1654) per cui la Creazione datava dal 4004 a.C., come ha ben scritto Nicoletta Morello [50]. Secondo lei, il Diluvio per Steno erode prima e ricostruisce poi, in vari cicli, la storia della Terra, incluse le catene montuose, che per Kircher invece erano state create direttamente da Dio fin dall’inizio come sono. In questo modo Stenone poteva disporre di uno strumento di cronologia per fare la storia geologica della Toscana che

mancava completamente a Kircher (e agli altri autori). Quella storia individuava tre cicli nelle famose sei *facies*, con tutte le loro modificazioni evolutive. Nel testo riassuntivo del *Prodromus* Stenone non tradisce alcuna titubanza sulla veridicità scientifica della cronologia biblica. Ma altre culture, come quelle cinese e egizia, retrodatavano la storia dell’umanità e del mondo. Fu merito della geologia stenoniana far germinare il dubbio che valesse la pena di cercare prove fisiche dell’età della Terra fuori delle tradizioni sacre e di quelle storico-letterarie.

Così, senza mettere in discussione il Diluvio come fatto storico, ma seguendo le idee litogene-tiche di Stenone nella formazione degli strati, Jacopo Grandi nel *De Veritate Diluvij* (1676) introduce un nuovo criterio cronologico a partire “dall’incremento annuo del suolo” (cioè tasso di sedimentazione, e spessore dei sedimenti) nei pozzi modenesi ([50], pp. 90, 91). Analogamente Francesco Bianchini, in *La Istoria Universale* (1697), perfeziona il criterio stratigrafico di Grandi utilizzando strati di lava prodotti da eruzioni vulcaniche di età storico-archeologica nota, in particolare quelle del Vesuvio. In una lettera a Buffon, prima di metà Settecento, Charles de Brosses apprezzava il criterio dello spessore degli strati di Grandi per ottenere età precise della Terra. Seguendo questo consiglio, oltre che il suo criterio di raffreddamento del globo (in piena Piccola Età Glaciale), Buffon cominciò a retrodatare l’età della Terra a molte decine di migliaia di anni nei suoi libri su *Théorie de la Terre e Époques de la nature* ([50], pp. 91, 92).

Cosa ne pensava Leonardo?

Potrà sorprendere, ma non è facile trovare letteratura su quale fosse il concetto di età della Terra in Leonardo. Neppure nei codici e nei manoscritti, dove ho cercato a lungo, e con me altri, come di recente anche Annibale Mottana [51], senza esito convincente. Leonardo non soffriva certo troppo di vincoli Scritturali, nonostante la sua fede religiosa, testimoniata, fra gli altri, da Vasari. Poi, all’improvviso, dopo una ricerca sistematica e non tematica, ecco apparirmi una frase chiara, indiscutibile, in un contesto solo apparentemente strano, dove Leonardo parla del sale:

Ma a dire meglio, essendo dato il mondo eterno, egli è necessario che li sua popoli, sieno ancora loro eterni, onde eternamente fu e sarebbe la spezie umana consumatrice del sale; e se tutta la massa della terra fussi sale, non basterebbe alli cibi umani, per la qual cosa ci bisognia confessare, o che la spezie del sale sia eterna insieme col mondo, o che quella mora e rinasca insieme cogli omuni d’essa divisoriori⁸.

Sull’eternità della specie umana Leonardo si sbagliava di certo, ma sulla propensione a un’età della Terra ultra-biblica coglieva nel giusto.

Vorrà la pena, per inciso, ricordare che proprio il tasso di accumulo dei sali nell’acqua del mare ha permesso a J. Joly nel 1899 di stimare per la Terra un’età di 100 milioni di anni (saliti a 300 nel 1930) [52].

Questa visione eternalista, quasi postulata a priori o da letteratura, esimeva Leonardo dal discutere i fatti e i processi che possono documentare un’età profonda della Terra, che veniva assunta come tale, pur non essendo chiaro a noi quali fossero i termini precisi dell’eternalismo

⁸ Manoscritto G., f. 49r.

leonardesco, o la sua derivazione. Tanto più che nello stesso passo del manoscritto G Leonardo aggiunge “il sale essere in tutte le cose create”. Infatti in passi in cui Leonardo si rivolge direttamente al tempo, quasi fatto persona, per descriverne gli effetti (Codice Atlantico, f. 71r; Codice Leicester, f. 31r; Codice Br. M, f.156r) non si avventura mai a parlare di tempi lontani. Anzi, riferendosi al centro del mondo, scrive che

se li muta al continuo el sito, delle quali mutazioni [...] una ne si varia ogni 6 ore, e alcuna è fatta in molte migliaia di anni⁹

rimanendo in tempi relativamente brevi, almeno per questo caso. E anche la sua visione eternalista trova qua e là qualche limitazione come nella apocalittica e profondamente religiosa profezia

la fertile e fruttuosa terra abbandonata rimarrà arida e sterile e per rinchiuso omore dell’acqua [...] tanto che, passata la fredda e sottile aria, sia costretta a terminare coll’elemento del fuoco; allora la sua superficie rimarrà in riarsa cenere, e questo sia il termine della terrestre natura¹⁰.

Ciononostante, a questo punto i percorsi dei due grandi padri della geologia divergono, con Leonardo che mantiene, come quasi sempre, la supremazia inventiva.

5. Conclusione

Due personaggi così diversi per storia, religione nativa, ed epoca di appartenenza hanno molte caratteristiche in comune. Quella più strabiliante consiste nell’aver scoperto i principi basilari della geologia stratigrafica nella stessa regione, la Toscana, l’uno per esservi nato, l’altro per esservi avventurosamente arrivato nella prima maturità, e ancor più avventurosamente pervenuto per ottenere riposo alle sue spoglie mortali.

Deve sorprendere di meno che l’eredità biblica della famiglia riformata abbia precluso a Stenone di ipotizzare un tempo geologico lungo, mentre la maggior libertà religiosa e l’irrefrenabile fantasia hanno evitato a Leonardo ogni preclusione sulla durata dei tempi cosmici. Stenone può consolarsi per aver reinventato la geologia degli strati, in cui leggere le tappe della storia della Terra e farne tessere agli eredi la scala miliardaria del tempo geologico.

Bibliografia

1. Kardel, T.; Maquet, P. *Nicolaus Steno*, 2nd ed; Springer Verlag: Berlin, 2018, p. 165, nota 7.
2. Lancisi, G.M. *Michaelis Mercati Samminiatensis, Metallotheca. Opus posthumum auctoriitate et munif. Clementis XI Pont. Max, e tenebris in lucem eductum Opera autem et studio Jo. Maria Lancisii archiatri pontificii illustratum*; Roma, 1717.

⁹ Codice Atlantico, f. 102 rb.

¹⁰ Manoscritto Br. M, f.155v.

3. Morello, N. The question on the nature of fossils in the 16th and 17th centuries. In Vai, G.B.; Cavazza, W. (eds.), *Four Centuries of the Word Geology: Ulisse Aldrovandi 1603 in Bologna*; Minerva Edizioni: Bologna, 2003; pp. 127-151.
4. Morello, N. The birth of stratigraphy in Italy and Europe. In Vai, G.B.; Cavazza, W. (eds.), *Four Centuries of the Word Geology: Ulisse Aldrovandi 1603 in Bologna*; Minerva Edizioni: Bologna, 2003; pp. 251-263.
5. Vai, G.B. A liberal diluvianism. In Vai, G.B.; Cavazza, W. (eds.), *Four Centuries of the Word Geology: Ulisse Aldrovandi 1603 in Bologna*; cit., pp. 220-249.
6. Vai, G.B. Chiaro-scuro, cicli, clima e tempo: la Vena del Gesso e la geologia del 2000. In Vai, G.B. (a cura di), *Paese, Valle, Territorio - Borgo Tossignano a 800 anni dalla fondazione*; Pagine di vita e storia imolesi, Ed. CARS: Imola, 1999, pp. 47-64.
7. Vai, G.B. La misura del tempo: gli stratotipi. In Poli, G. (a cura di), *Geositi testimoni del tempo*, Regione Emilia-Romagna, 1999, pp. 107-112.
8. Vai, G.B. (a cura di), *Athanasius Kircher, Mundus Subterraneus* (Editio Tertia 1678), Arnaldo Forni Editore: Bologna, 2004/2011; pp. 22+390+524.
9. Vai, G.B. Leonardo, la Romagna e la geologia. In Marabini, C.; Della Monica, W. (a cura di), *Romagna. Vicende e Protagonisti*; Edison Edizioni: Bologna, 1986; vol. 1, pp. 30-52.
10. Vai, G.B. Geological priorities in Leonardo da Vinci's notebooks and paintings. In Giglia, G.; Maccagni, C.; Morello, N. (eds.), *Rocks, Fossils and History*, Proceedings of the 13th INHIGEO Symposium, Pisa-Padova, 1987; Festina Lente Edizioni: Firenze 1995; pp. 13-26.
11. Vai, G.B. I viaggi di Leonardo lungo le valli romagnole: Riflessi di geologia nei quadri, disegni e codici. In *Leonardo, Machiavelli, Cesare Borgia: Arte, Storia e Scienza in Romagna (1500-1503)*; De Luca Editori d'Arte: Roma, 2003; pp. 37-47.
12. Vai, G.B. Storia breve della geologia in Italia. In Pievani T. (a cura di), *Scienze e tecnologie*, v. VIII, Storia della Cultura Italiana (dir L.L. Cavalli Sforza); Utet: Torino, 2009; pp. 304-345.
13. Vai, G.B. Leonardo e la geologia: la scienza indagata nel paesaggio. In *Naturale e/o Arte-fatto*. Mimesis: Milano, collana Filosofie, 2015, n. 348, 31-39.
14. Vai, G.B. Leonardo da Vinci's and Nicolaus Steno's geology. *Earth Sciences History*, 2021, 40, 293-331, <https://doi.org/10.17704/1944-6187-40.2.293>.
15. Dominici, S.; Rosenberg, G.D. Nicolaus Steno and earth science in Early Modern Italy. *Substantia*, 2021, 5 (Suppl.), 5-17, <https://doi.org/10.36253/Substantia-1273>.
16. Dominici, S. A man with a master plan: Steno's observations on Earth's history. *Substantia*, 2021, 5 (Suppl.), 59-75, <https://doi.org/10.36253/Substantia-1278>.
17. Dominici, S. The Volterra cliff in the mind of philosophers, savants and geologists (1282-1830). In Clary, R.M.; Pyle, E.J.; Andrews, W.M. (eds.), *Geology's Significant Sites and their Contributions to Geoheritage*; Geological Society Special Publication 54; Geological Society: London, 2023,
18. Capellini, G. Résolutions concernant la nomenclature et les couleurs votées par le congrès. In *Congrès Géologique Internationale*, Compte Rendu de la 2me Session, Bologne, 1881; Imprimerie Fava et Garagnani: Bologne, 1882; pp. 196-198.

19. Vai, G.B. L'anabasi di Steno. Visita alla tomba nella basilica medicea di San Lorenzo a Firenze, *Geoitalia*, 2001, 8, 21-24; *Tribute to Steno*, <https://iugs.org/32igc/GeneralProceedings/Tributetosteno.htm>, 2004.
20. Vai, G.B. A history of chronostratigraphy. *Stratigraphy*, 2007, 4, nos. 2/3, 83-97.
21. Vai, G.B. The Scientific Revolution and Nicholas Steno's twofold conversion. In Rosenberg, G.D. (ed.), *The Revolution in Geology from the Renaissance to the Enlightenment*, Memoir 203; The Geological Society of America: Boulder (CO) 2009, pp. 187-208.
22. Vai, G.B. Light and shadow: the status of Italian geology around 1807. In Lewis, C.L.E.; Knell, S.I. (eds.), *The Making of the Geological Society of London*, Geological Society Special Publication 317; Geological Society: London, 2009; pp. 179-202.
23. Vai, G.B. Giovanni Capellini, Michele Gortani e la valorizzazione vecchia e nuova del patrimonio marsiliiano in vista del tricentenario dell'Istituto delle Scienze di Bologna. *Museologia Scientifica Memorie*, 2011, 7, 99-111.
24. Lyell, C. *Principles of Geology*; John Murray: London, 1830-1833; 3 vols.
25. Dean, D.R. *James Hutton and the History of Geology*; Cornell University Press: Ithaca and London 1992; 303 p.
26. Romano, M. Reviewing the term uniformitarianism in modern Earth sciences. *Earth-Science Reviews*, 2015, 65-76.
27. Vai, G.B. Aldrovandi's Will introducing the term 'Geology' in 1603. In Vai, G.B.; Cavazza, W. (eds.), *Four Centuries of the Word Geology: Ulisse Aldrovandi 1603 in Bologna*; cit., pp. 65-111.
28. Mottana, A. (a cura di), *Niccolò Stenone. Su un corpo solido contenuto naturalmente entro un altro solido. Prodromo a una dissertazione*; Edizioni Teknos: Roma, 1995; 66 p.
29. Miniati, S. *Nicholas Steno's Challenge for Truth*, Franco Angeli: Milano, 2009; 331 p.
30. Cfr. Baratta, M. *Leonardo da Vinci ed i Problemi della Terra*; Fratelli Bocca: Torino, 1903; pp. 244-245.
31. Vai, G.B.; Cavazza, W. Ulisse Aldrovandi and the origin of geology and science. In Vai, G.B.; Caldwell W.G.E. (eds.), *The Origins of Geology in Italy*; The Geological Society of America Special Paper 411; The geological Society of America: Boulder, CO, 2006; pp. 43-63.
32. Guntau, M. *Die geologischen Vorstellungen von Nils Stensen (1638-1686) über die erdgeschichtliche Vergangenheit von Versteigerungen*; Beiträge Geologie Wissenschaftsgeschichte: Dresden, 1996; 143 p. (pp. 85-87).
33. Gressly, A. *Observations géologiques sur le Jura soleurois*; Imprimerie de Petitpierre: Neuchatel, 1838; 349 p. (pp. 10-12, 20-25).
34. Oldroyd, D.R. *Thinking about the Earth: A History of Ideas in Geology*; Athlone: London; Harvard University Press: Cambridge, MA, 1996; 410 p.
35. Vail, P.R. Seismic stratigraphy and global changes of sea level. *Bulletin AAPG.*, Memoir 26, 1977, 49-212.
36. Morello N. *La nascita della paleontologia nel Seicento: Colonna, Stenone, Scilla*; Franco Angeli: Milano, 1979; 265 p.

37. Berger, G. Leonardo da Vinci: Founder of the Science of Geological Facies. *Lithology and Mineral Resources*, 2005, 40, 89-91.
38. Edgerton, S.Y. *The Renaissance Rediscovery of Linear Perspective*; Basic Books: New York, 1975; xvii + 206 p.
39. Kemp, M. *Leonardo on Painting*, Yale University Press: New Haven, CT, 2001; 320 p.
40. Rosenberg, G.D. An artistic perspective of the continuity of space and the origin of modern geologic thought. *Earth Sciences History*, 2001, 20, no. 2, 127-155.
41. Laurenza, D. Storia del Codice Leicester dopo Leonardo. Nuove evidenze. In Galluzzi, P. (a cura di), *L'acqua microscopio della natura. Il codice Leicester di Leonardo da Vinci*, Catalogo della Mostra; Giunti: Firenze, 2018; pp. 267-287.
42. Mottana, A. Leonardo e la scoperta della storia della Terra. In Galluzzi, P. (a cura di), *L'acqua microscopio della natura. Il codice Leicester di Leonardo da Vinci*; cit., pp. 289-299.
43. Pedretti, C. (a cura di), *Leonardo: Il Codice Hammer e la Mappa di Imola. Arte e Scienza a Bologna e in Emilia e Romagna nel primo Cinquecento*. Catalogo della mostra di Bologna, Palazzo del Podestà, 1985; Giunti Barbera Edizioni: Firenze, 1985; 205 p.
44. Ziggelaar, A. The age of Earth in Niels Stensen's geology. In: Rosenberg, D.G. (ed.), *The Revolution in Geology from the Renaissance to the Enlightenment*; cit., pp. 35-142.
45. Venturi, J. *Essai sur les ouvrages physico-mathématiques de Léonard de Vinci*; Duprat: Paris, 1797.
46. Cutler, A., H. Nicolaus Steno and the problem of deep time. In: Rosenberg, D.G. (ed.) *The Revolution in Geology from the Renaissance to the Enlightenment*; cit., pp. 143-148.
47. Pagano, P. *Storia del pensiero biologico evolutivo*; Enea: Roma, 2013.
48. Vai, G.B. Isostasy in Luigi Ferdinando Marsili's manuscripts. In Vai, G.B., Caldwell, W.G.E. (eds.), *The Origins of Geology in Italy*; cit., pp. 95-127.
49. Vaccari, E. European views on terrestrial chronology from Descartes to the mid-18th Century. In Lewis, C.L.; Knell, S.J. (eds.), *The Age of the Earth: From 4004 BC to AD 2002*, Geological Society Special Publication 190; Geological Society: London, 2001; pp. 25-37.
50. Morello, N. Steno, the fossils, the rocks, and the calendar of the Earth. In Vai, G.B.; Caldwell, W.G. E. (eds.), *The Origins of Geology in Italy*; cit., pp. 81-93.
51. Mottana, A. Omaggio a Leonardo. *Rendiconti Accademia Scienze Napoli*, 2018, 85, 77-113, doi: 10.32092/1007.
52. Wyse Jackson, P.N. John Joly (1857-1933) and his determinations of the age of the Earth. In Lewis, C.L.E.; Knell, S.J. (eds), *The Age of the Earth: from 4004 BC to AD 2002*, cit., pp. 107-119.

Il volo cieco dei pipistrelli. 1793, Lazzaro Spallanzani e la ricerca sui chirotteri, mammiferi volanti

Stefano Meloni

Presidente Centro Studi Lazzaro Spallanzani, Scandiano

Contributo presentato da Luigi Bolondi

Abstract

Spallanzani carried on his researches on the blind flight of bats mainly in Scandiano, in the summer of 1793 and 1794, thanks to the great number of *Chiroptera* (bats) in the Rocca basement and in the tower. He wanted to discover how the bats can fly in total darkness, avoiding obstacles. He performed a series of experiments in which all the senses were eliminated in turn, but none of them seemed to be of any essential importance. In the end he concluded that blind bats are guided by their ears, *i.e.* “*ci vedessero con le orecchie*”.

Keywords

Chiroptera, Bat, Blind fight, Experiments, Darkness

E’ opinione comune tra gli studiosi di Spallanzani che lo scienziato abbia iniziato le ricerche sul volo cieco dei pipistrelli nel 1793-94, mentre si occupava di una piccola civetta dal verso inconfondibile, che lui chiamava appunto famigliarmente “Chiù” (*Otus scops*). In realtà gli studi sui mammiferi “volanti” devono essere spostati indietro, al 1773, quando Spallanzani si interessava degli studi sugli animali privati dell’aria. È pur vero tuttavia che la vera svolta al lavoro sui pipistrelli si ebbe esattamente il 5 agosto 1793, quando lo scandianese scrive: “Ho voluto sapere se i Chiù nelle folte tenebre ci veggono”. Così, in una delle sue consuete prove sperimentali, liberò tre piccole civette che al chiarore di una semplice candela volavano con sicurezza all’interno di una piccola stanza adibita alla prova. Quando la candela veniva spenta: “[il Chiù] andava a urtare contro la muraglia, o contro altro, poi cadeva a terra come uno straccio [...]. Resta dunque deciso che nella totale privazione della luce non ci veggono”. L’interesse per gli uccelli predatori notturni si ferma qui; Spallanzani ha appurato che sono in grado di volare agevolmente con precarie condizioni di luce, ma al buio totale appaiono ciechi. Sappiamo quanto Spallanzani nelle sue ricerche compisse talvolta salti tassonomici tra i soggetti osservati; l’idea era verificare se altri soggetti volanti, non più uccelli, ma mammiferi, potessero volare nell’assoluta oscurità.

Il nostro compie così la medesima prova nello stesso stanzino utilizzato per i Chiù e si accorge che anche a candela spenta i pipistrelli, al contrario degli uccelli, mantengono un volo regolare senza sbattere contro alcuno ostacolo. La cosa non stupisce lo scienziato, egli immagina che quel luogo che è apparso ai suoi occhi buio, in realtà non lo sia, e afferma: “quel luogo che noi credessimo tenebroso affatto non lo è del tutto, giacché senza luce i pipistrelli non ci vedrebbero”. Reazione del tutto naturale: chi è in grado tra i viventi di orientarsi nel buio totale? Così giunge a pensare che se all’occhio umano quella stanza appariva del tutto oscura, forse non lo era per il pipistrello, dotato di capacità visive superiori a quelle umane. Occorreva giungere ad un’altra prova mutuata dalla falconeria: oscurare con un cappuccio, opportunamente predisposto, gli occhi del pipistrello per impedirgli la visione, proprio perché questa, forse era superiore a quella dell’uomo. Inizialmente la prova conferma le ipotesi di partenza: il pipistrello è turbato dal cappuccio e non vola con regolarità, quindi anche il pipistrello al buio totale non vola? Spallanzani non si accontenta certo di una semplice prova sperimentale, decide di proseguire inibendo la visione del chiroterro con palline di vischio poste ad occludere gli occhi. Nulla delle ricerche, fino a lì condotte, faceva ipotizzare che si dovesse indagare altrove e non sul senso della vista. Il pipistrello, con la vista inibita, vola regolarmente. Lo studioso, dando per accertato che ciò non dovrebbe essere possibile in natura, procede con interventi più invasivi allo scopo di “cancellare” dal chiroterro la possibilità di vedere. Elimina i bulbi oculari, recide il nervo ottico, riempie le cavità con palline di vischio, opera drasticamente alla esclusione di un senso. I tentativi appaiono inutili: “È incredibile la sorpresa in me cagionata da questo pipistrello che assolutamente ci vedeva, quantunque privo del bulbo degli occhi”. Il rapporto tra orientamento e vista era ciò che la scienza da sempre aveva teorizzato, tuttavia i chiroterri privati della vista continuavano a orientarsi efficacemente. Ipotizza quindi inizialmente che i pipistrelli possiedano un senso a noi sconosciuto che permette loro di volare nelle tenebre, senza ostacoli. Poi procede a verificare gli altri sensi presenti nei viventi: udito, tatto, gusto, odorato, operando via via per esclusione, verificando se il volo cieco dei pipistrelli sia governato, se non dalla vista, da un altro dei rimanenti sensi.

Quattro mesi dopo l'inizio della ricerca Spallanzani traccia un primo provvisorio bilancio dei risultati: "È chiaro che l'udito, e molto meno il gusto non possono concorrere a produrre i [fenomeni osservati]. Tutti gli sforzi per spiegare questi strani fenomeni si riducono al tatto e all'odorato". Già il 17 ottobre 1793, da Scandiano dove stava operando, scrive: "[...] il tatto non può supplire nei pipistrelli alla mancanza dell'occhio, mostra pure che non si può ricorrere all'udito".

Le esperienze condotte sui pipistrelli, mentre è giunto l'inverno e le prove sperimentali devono essere interrotte, vengono raccontate dallo Spallanzani allo svizzero J. Sénèbier e tramite lo scienziato alla Società di Studi Naturalistici di Ginevra. Così il naturalista ginevrino L. Jurine venuto a conoscenza della memoria dello scadianese opera a sua volta sui pipistrelli e con prove circostanziali pare dimostrare che la capacità mostrata dai chiroteri nell'orientarsi nel volo cieco sia da attribuire all'udito.

Spallanzani indefessamente ricomincia nel maggio del 1794 a Scandiano le prove compiute in precedenza. Questa volta, ammaestrato dalle prove di Jurine, in riferimento all'udito, utilizza materiali come il sego capaci di occludere con successo i canali auditivi. La ricerca sperimentale sui pipistrelli, che oggi definiremmo etologica, è giunta al termine, Spallanzani può legittimamente affermare: "[...] convien dire che allora non faccia uso [il pipistrello] dell'occhio, ma dell'udito, ed il fenomeno si può spiegare col dire che il moto delle ali e del corpo urtano l'aria e questa venendo riurtata dai corpi solidi circostanti, egli li senta, e li declini [...]. Adunque bisogna dire che di giorno il pipistrello non si serva degli occhi, ma che voli diretto ne' suoi voli dall'udito [...]" . Tutte le esperienze condotte da Spallanzani sul volo cieco dei pipistrelli sono effettuate nei mesi estivi a Scandiano dove l'approvigionamento dei pipistrelli è possibile nella Rocca dei Boiardo che ne è una vera e propria miniera. I sotterranei, grandi e tortuosi, ricchi di volte e anfratti nelle pareti, da anni in stato di quasi abbandono, sono ricchi di pipistrelli che vi soggiornano nei mesi estivi a veri "grappoli". Appartengono ad una specie che lo scienziato familiarmente definisce a "ferro di cavallo" per la forma tipica del muso. Sono di piccole dimensioni, facilmente catturabili o uccisi con "lo schioppo a vento".

La facciata della casa natale dello scienziato, quella dove erano poste le sue stanze, è posta a sud e nei pomeriggi estivi è raggiunta dal sole che la scalda senza sosta, così Spallanzani, ormai aduso al clima pavese, preferisce chiedere al marchese di Scandiano, figlio naturale di Ercole III signore del ducato di Modena e Reggio, di poter usufruire di due stanze, una per sé, l'altra per il suo servitore Giovanni (detto Giò), anche se piccole, nella torre della rocca, i cui muri assicurano una temperatura confortevole (Spallanzani la misura scoprendo che si aggira nel pomeriggio attorno a 20 gradi, mentre nei sotterranei essa scende a 16, e nei granai sale a 24). Anche i granai sono in stato di semiabbandono e anche lì abbondano i pipistrelli che sostano nelle travature dei tetti e appartengono alla stessa specie di quelli presenti nei sotterranei. La supplica al marchese viene accolta e Spallanzani può ora disporre di una stanza in torre dove effettuare gli esperimenti e dove ha fatto portare dalla propria casa l'occorrente in strumenti e materiali dal fido servitore Giò, che insieme a lui e al fratello Nicolò provvederà alla cattura dei piccoli mammiferi volanti. Ha inizio il suo lavoro di ricerca che ha come luoghi di elezione i sotterranei della rocca e i granai della stessa. Il primo obiettivo appare senz'altro quello di intra-

prendere una attenta osservazione intorno alle caratteristiche e al comportamento dei chiroteri, per verificare dove vivano, dove nidifichino, come si comportino in volo.

Scandiano, 30 luglio 1793. *Ho voluto esaminare i luoghi della Rocca dove si trovano i pipistrelli. Sono tutti dei soliti, di cui porterò alcuni saggi a Pavia. Di sopra la Rocca in un granajo ve ne stanno diversi attaccati alle travi, e sempre capovolti: alcuni insieme attaccati fanno un gruppo solo, e due o tre sostentano cinque o sei. [...] Ne'sotterranei della Rocca vi sono sotto nel cielo delle magnifiche volte fatte di mattoni vi sono dei buchi, dentro ad ognuno de' quali trovasi un pipistrello. Tutti capovolti e attaccati alla volta si trovano dunque in quelle tenebre, come si vede da una candela appressatavi. Formano ammassi, ed andandovi sotto non si muovono, ma si dimenano forte, e solamente in parte fuggono, gettandovi un sasso contro. Ma è incomodissimo andarvi sotto per l'orina che mandan fuori a gocce. [...] Come ho veduto di sopra nel granajo nominato, poiché avendone uccisi diversi, li ho trovati tutti vecchi. Ecco la distinzione tra vecchi, e i giovani. Il pelo degli ultimi è più morbido, più fino massimamente nel ventre.*

Scandiano, 7 agosto 1793. *A un ora e mezzo di notte sono andato ne'Sotterranei della Rocca dove di giorno è un esercito di pipistrelli, e non ne ho trovato che uno giovane, e che volava anche male [...] erano dunque alla pastura. Il cielo era affatto sereno, e in conseguenza i punti di luce delle stelle potevan servire loro per vedervi. [...] Alle ore 7.mattutine di questo medesimo giorno essendo andato ne'sotterranei, vi ho trovato come l'altre volte i ritornati pipistrelli.*

Verso la fine di agosto Spallanzani si impegna nei primi esperimenti volti a inibire la vista dei pipistrelli, prima con il nominato cappuccio da falconeria, poi con un cappuccio di “rete rara”, infine eliminando i bulbi oculari dei chiroteri.

Scandiano, 25 agosto 1793. *[...], dopo ho coperta la testa con la solita borsetta di pelle nera ed opaca; allora il pipistrello dall'urtare incessantemente nelle pareti laterali, dava segno di non vederci: ma che? posta nella testa una borsetta di tela rara di filo, quasi quasi accade lo stesso. Questi fenomeni mi hanno determinato a farne un altro ch'io credea decisivo, ed è stato di levar gli occhi a qualche pipistrello. Adunque con la punta delle forbici ho levato il bulbo degli occhi intero ad un pipistrello. Su le prime, forse pel troppo dolore, si è arrestato a terra: poi messo nell'aria si è dato a volare speditamente, infilando i corridoi dei sotterranei, due o tre volte li ha corsi volando da cima a fondo con la speditezza e sicurezza di un pipistrello illeso, e più di una volta si è attaccato alle pareti laterali, e al cielo dei sotterranei, ed in fine si è piantato entro un buco del cielo del diametro di due pollici [...] è incredibile in me la sorpresa di questo pipistrello che assolutamente ci vedeva, quantunque privo del bulbo degli occhi.*

Scandiano, 30 agosto 1793. *Sono poi passato a due altri tentativi, che dovevano veramente decidere, se que'moti in aria erano accidentali, o diretti da un principio equivalente a quello dell'organo visivo. Il primo è stato il seguente. In Rocca evvi una scaletta segreta a lumaca, che dal fondo piano primo conduce nel Piano di un superiore Appartamento, e questa scala*

ha gradini 49., e l'altezza di un gradino è di pollici 6. I rami della scala sono 6. L'altezza della sommità della volta [ai sottostanti gradini] è piedi 6., pollici 6. La larghezza della scala è piedi 2., pollici 3. Sicché questa scala è angusta di molto. Quattro persone si sono poste in differenti siti della scala in modo, che la vedevano tutta da fondo a cima, ognuno cioè vedendo il proprio pezzo. La scala in cima e nel fondo aveva un uscio che la chiudeva. Un pipistrello slobato si è posto in fondo a questa scala, che per l'angustia ed essere a lumaca, doveva decidere se egli volava all'azzardo, nel qual caso spesso doveva urtare. Si è dunque posto in fondo. Egli si è messo a volare ascendendo; non ha urtato di sopra, né ai lati, giunto alla sommità del primo ramo della scala ha egregiamente piegato, ed è salito più alto: ha seguitato all'insù il suo cammino senza mai urtare in alcun luogo, poi si è attaccato ad un piccolo sporto. Io l'ho smosso di là. Allora è disceso senza mai urtare, piegando del continuo in ragione che piega la scala. [...] Più e più volte si è fatto questo giro al pipistrello, e dal basso e dall'alto, e dall'alto al basso, senza mai urtare, solamente cercava a volta a volta di attaccarsi. Si è fatt'uso, nella medesima scala di un pipistrello sano: e costui non ha fatto di più, né di meno del mutilato.

L'altro cimento è stato questo. Una cameretta angusta, e bassa si è riempita di frasche d'alberi, e così in alto e al basso, e a mezz'aria erano imbarazzi per tutto. Lasciato andare in questa stanza il pipistrello che si era sì portato bene nella scala segreta nominata, costui mirabilmente ha sempre, e poi sempre, declinato gli imbarazzi, senza una sola volta intoppare. [...] Questi due cimenti non possono essere più decisivi.

Scandiano, 3 settembre 1793. *Presi questa mattina 3. pipistrelli, due erano maschi e uno femmina. Li ho presi per vedere se impedito l'odorato delle narici e della bocca (giacché questo probabilmente comunica dentro la bocca, come in altri diversi animali) seguitano a volare. [...] Ho turato con cera-lacca i due fori del naso ad un pipistrello dopo averlo accecato con un filo di ferro infocato. Si è portato benissimo nel volo.*

A questo punto Spallanzani dà per appurato che sia la vista che l'odorato non governano il volo cieco dei pipistrelli. Si appresta quindi sul finire dell'estate scandianese, nei primi giorni di ottobre, a verificare se anche il corpo del pipistrello ed eventualmente il tatto sono in grado di orientare il piccolo mammifero in volo.

Scandiano, 9 ottobre 1793. *Dopo di aver fatto col calore divenire vegeto il piccolo ferro di cavallo (pipistrello con il naso a ferro di cavallo), ho coperto il suo corpo con la pelle sottilissima d'un gozzo di pollastro attaccata per via di colla di farina per ogni dove al corpo: costui non si è molto alzato pel troppo ingombro, pure piegava dove piega la stanza, ecc. ecc., e non ha mai urtato.*

Scandiano, 14 ottobre 1793. *Per vedere quanto si dee valutare il tatto, ne ho accecato uno col fuoco, indi l'ho posto in una camera piccola, e bassa, e verso il mezzo di essa, ho attaccato un filo orizzontale, affidato a due chiodi alle opposte pareti: questo filo toccava quasi la volta, e però il pipistrello non poteva passare sopra di esso. Dal filo orizzontale pendevano*

più fili verticali fino a terra, e perché tenessero la perpendicolarità avevano ciascuno un sassetto attaccato all'estremità inferiore. Il pipistrello passava tra gli spazi senza urtare i fili. Nell'aria poi, e nei fili non ha mai cercato di appendersi: lo ha fatto solo quando era vicinissimo alle pareti.

Dopo il 20 ottobre Spallanzani lascia Scandiano, si è fatto ormai autunno ed è inutile continuare gli esperimenti quando i pipistrelli della rocca sono andati in letargo. A Firenzuola, l'8 novembre compie una specie di dimostrazione di fronte a diversi spettatori, mostrando i vari tentativi da lui compiuti a Scandiano e i risultati ottenuti. A Pavia per tutto l'inverno 1793 e la prima primavera del 1794 lo scienziato continua le riflessioni sugli esperimenti compiuti e mette a punto una teoria sul volo cieco.

Per poter comprendere appieno la ricerca di Spallanzani sui chiroterri è necessario leggere ciò che lui stesso ha scritto in un piccolo volume stampato a Torino nel 1794 dal titolo *Lettere sopra il sospetto di un nuovo senso nei pipistrelli* (Fig. 1)¹. Lo scienziato scandianese non ha

ancora stabilito cosa permetta ai pipistrelli di volare anche se accecati; la logica lo induce a pensare che ogni essere vivente si orienta utilizzando la vista, anche se sa benissimo che altri sensi possono aiutare, e lo afferma lui stesso parlando dei ciechi. E su quel senso, come abbiamo visto punta le sue indagini più approfondite. Scrive al suo amico e traduttore Sénébier una lunga lettera che chiama *Memoria dell'abate Spallanzani sopra di alcune specie di pipistrelli, che dopo di averle acciecate, eseguiscono puntalmente col volo tutti quei riflessivi movimenti nell'aria, che da loro si fanno quando sono vegeti, e che eseguir non si possono da altri volanti animali, se non colla scorta dell'occhio.*

Spallanzani racconta nel volume in modo dettagliato tutti gli esperimenti da lui portati avanti e illustra ciò che in sintesi abbiamo riportato dalle sue lettere, passi verso “la recente curiosissima mia scoperta, la quale a mio avviso è nel numero di quelle che, son vere, senza essere verisimili”.

Sono particolarmente interessanti le pagine nelle quali lo studioso, tralasciato il senso della vista perché infruttuoso, esplora gli altri sensi, in alcuni casi sorridendo di se stesso, quando si chiede se nell'orientamento dei pipistrelli abbia una qualche funzione il *gusto*.

Fig.1. Nel 1794, presso la Stamperia Reale di Torino, Spallanzani pubblica un piccolo volume dal titolo *Lettere sopra il sospetto di un nuovo senso nei pipistrelli*. In esso lo studioso racconta in sintesi la sua ricerca etologica sul volo cieco dei pipistrelli. Non è ancora giunto alla conclusione del suo lavoro, non è ancora arrivato a dire che i pipistrelli “ci vedano con le orecchie”, come avverrà in seguito, ipotizza che i mammiferi volanti da lui studiati posseggano un ulteriore senso rispetto a quelli da noi conosciuti.

¹ Tutte le immagini sono pubblicate a colori nell'edizione online degli *Annales*.

Si riportano qui alcuni brani tratti da *Lettere sopra il sospetto...* che, con le parole stesse di Spallanzani, raccontano le ricerche compiute dallo scienziato per quel che riguarda il *tatto*, l'*uditio* e l'*odorato* nel pipistrello, sempre alla ricerca di ciò che l'animale volante utilizzava in sostituzione della vista per orientarsi. Questo quando ancora Spallanzani non si era convinto della responsabilità dell'udito come organo sovrano, che presiede nel chirottero all'orientamento.

Spallanzani alla data di pubblicazione del libro ancora afferma:

[...] Non potrebbe credere quante e quanto variate esperienze su d'un tal punto [la vista] io m'abbia fatte, le quali però tutte hanno disposto per la negatività; onde io quasi inclino a credere, almeno fino al presente, che al difetto degli occhi, supplisca un novello organo, o senso, che non abbiamo noi, e del quale in conseguenza non potremo mai avere idea. Ma su tale articolo aspetto la primavera per fare nuove esperienze [...].

Il *tatto*. Supponendolo delicatissimo nel pipistrello, certamente questo senso è assai lusigniero. Aggirandosi egli acciecati in una stanza, e rasentandone le pareti, la reazione della colonna d'aria, frapposta a lui, e alla vicina parete, facendo qualche impressione contro il suo corpo, dovrà in certo modo avvertirlo della vicinanza di quel corpo solido, quindi volendo lo declinerà.

1. Ma primariamente io dubito forte, che questa delicatezza di tatto nei pipistrelli sia meramente precaria, per essere questo animale vestito di peli, come la maggior parte degli altri quadrupedi, *e sappiamo, che in essi il tatto è l'ultimo dei sensi, ossia di tutti meno perfetto.*

[...] 6. Un pipistrello senz'occhi posto in una stanza ingombra di sottili rami di alberi, sa passarvi di mezzo senza quasi mai darvi dentro coll'ali.

7. Se dalla volta di una camera vengon giù fino a terra più fili sottilissimi di seta, paralleli tra loro, e verticali al solajo per via di un picciol peso attaccato all'estremità inferiore, e questi fili sieno tra se distanti abbastanza per dar passaggio ad un pipistrello, sprà egli passarli senza toccar I fili, e se talvolta vi urterà contro, altrettanto succede ancora ad un pipistrello veggente. [...]

8. Fatta una vernice di sandaracca (resina ricavata da un albero appartenente alle conifere con la quale si fanno composti per le vernici) e spirito di vino, e con picciol pennello data una mano a tutto il corpo del pipistrello acciecati, al muso e alle ali, stenterà da principio a volare, pure dopo un po' di tempo preso vigore, volerà, declinerà gli ostacoli, e passerà dentro a' fili di seta di anzi ricordati. [...] Ed è a notarsi che una seconda, ed anche terza mano di vernice non pregiudica ai regolari voli dell'animale.

L'*uditio*. Ella ed io turate le orecchie ai pipistrelli, se non che io mi sono servito di una paltottolina di vischio conficcata, e calcata nel fondo della conca, e ciò per impedire solamente l'ingresso dell'aria, senza addolorar l'animale [...] undici sono stati gl'individui acciecati, cui col vischio ho chiuso le orecchie. Dieci nel volo si sono portati benissimo, ma l'undicesimo volava a stento, quantunque prima dell'operazione volasse benissimo [...].

2. Ma a me sembra che indipendentemente dall'otturamento delle orecchie sia facile il mostrare, come l'uditio supplire non possa a difetto dell'occhio. Supporre volendo acutissimo questo senso nei pipistrelli, intendo bene come essi radendo la muraglia, o qualunque altro solido e spazioso corpo, possano forse udire il suono dell'aria da essi corpi ripercossa o anche qualche modificaione di suono nata in quel tempo nelle loro ali.

L'odorato. Essendo I pipistrelli nella classe dei quadrupedi, ed avendo questi l'odorato eccellente in agguaglio agli uomini, e agli uccelli, sembrerebbe che di questo senso nella presente ricerca si dovrebbe far più caso, che degli altri tre [...] Con cera di Spagna fusa ella ha suggellato le narici a diversi di questi animali, e tutti tosto dopo l'operazione urtavano nei corpi, e cadevano. [...] I primi tentativi nulla decidono a favor dell'odorato, come scorta del regolato volare dei pipistrelli acciecati. Neppure io so intendere come la grazia di questo senso arrivino ad accorgersi dei sottilissimi fili di seta, artatamente opposti al loro cammino [...] Ingenuamente lo confesso, che io non trovo verun ragionevole rapporto tra I summenzionati fatti, e la supposta ragione.

Avendo eseguito ogni possibile prova intorno ai diversi sensi presenti nei pipistrelli, quando Spallanzani scrive questa memoria ipotizza la presenza nei chiroterri di un nuovo senso all'uomo sconosciuto. Sarà necessario giungere all'aiuto dello scienziato svizzero Jurine perché Spallanzani si convinca che è l'uditio il senso che I pipistrelli utilizzano per orientarsi.

Scorrendo il *Giornale delle Sperienze e Osservazioni* (Fig. 2) pur nella difficoltà dovuto al "disordine" espositivo (Spallanzani utilizzava ogni lembo di carta utile per le proprie annotazioni; talvolta i brani, posti sia in orizzontale che in verticale, non seguivano un ordine cronologico) si ha l'impressione che la ricerca sul volo cieco dei pipistrelli sia stata una sorta di esercizio di curiosità intellettuale. Questa ricerca sperimentale, per certi versi archetipica, appare significativamente differente dalle consuete svolte dallo scienziato, soprattutto per il modo con cui Spallanzani condivise con altri studiosi metodi di lavoro utilizzati e risultati ottenuti. Nel Giornale vi sono poi numerose pagine (Fig. 3) che indagano oltre il tentativo di scoperta del senso che governava il volo dei pipistrelli, preludono a quella che sarà una nuova importante tenzone: quella sulla ibernazione e la respirazione, che lo occuperà negli ultimi anni della sua vita.

Nonostante il proposito di dare alle stampe il lavoro sui pipistrelli, Spallanzani non pubblicò mai un

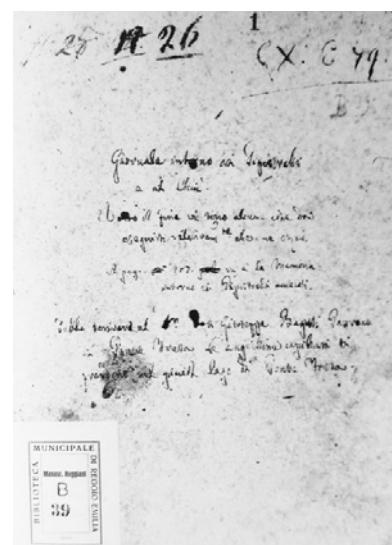


Fig. 2. Presso la biblioteca Antonio Panizzi di Reggio Emilia sono conservati i numerosi manoscritti che Niccolò Spallanzani, fratello di Lazzaro e suo erede, cedette alla Comunità della città. Fra questi, come si vede dall'immagine, vi è un corposo manoscritto dove lo scienziato scandianese andava prendendo appunti durante la sua ricerca sul volo cieco dei pipistrelli, il suo giornale di lavoro. L'intestazione porta come titolo: *Giornale intorno ai pipistrelli e ai Chiù*.

volume dedicato al volo cieco dei piccoli mammiferi. La ragione di ciò ovviamente non la conosciamo, possiamo solo supporre che il suo interesse per l'argomento, una volta scoperto il "segreto" dei chiroterri, potesse essere scemato.

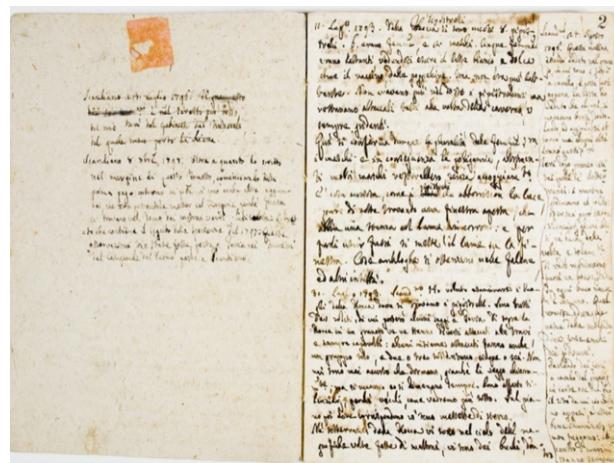


Fig. 3. Prima pagina del manoscritto spallanzaniano *Giornale intorno ai pipistrelli e ai Chiù.*

Nonostante fossero assai scarne, se non per un ristretto gruppo di scienziati, le notizie sulla scoperta effettuata, molti fra seri sperimentatori e naturalisti dilettanti furono attratti dallo studio sui pipistrelli. Questa indagine spallanzaniana finì nel tempo per oscurare altre più consistenti ricerche che lo studioso aveva felicemente portato a termine. Ancora oggi il nome di Spallanzani è associato ai pipistrelli, forse proprio per l'alone di mistero che avvolge questi esseri viventi che volano come gli uccelli, ma sono mammiferi e, per il loro essere animali notturni, sono entrati negativamente nell'immaginario collettivo.

Dopo un periodo di clamore nel quale memorie, dissertazioni, lettere fiorirono intorno all'argomento, sarà necessario giungere al 1920, quando lo scienziato Hartridge avanzò l'ipotesi dell'emissione di ultrasuoni che vengono rinviati (eco) dagli ostacoli e dalle prede che vengono colpiti. Solo nel 1944 gli studiosi americani Griffin e Galambos confermarono sperimentalmente l'ipotesi, alla quale diedero il nome di "eco localizzazione". La maggioranza dei suoni emessi dai chiroterri è caratterizzata da onde con frequenza più elevata di quella udibile dall'uomo, che è in grado di percepire suoni tra i 15 e i 20 kHz mentre i suoni emessi dai pipistrelli vanno da 9 a 200 kHz. Gli ultrasuoni prodotti dalla laringe vengono emessi dalla bocca, i loro echi sono captati dalle orecchie dei pipistrelli ed elaborati in modo repentino con complesse analisi dal cervello. Il pipistrello a "ferro di cavallo", proprio quello che si trovava numerosissimo nella Rocca di Scandiano e ha fornito a Spallanzani materiale di studio, emette e riceve ultrasuoni anche attraverso le strutture nasali.

Alla luce delle attuali conoscenze intorno all'orientamento dei pipistrelli durante il proprio volo, si può affermare che Spallanzani abbia dato incontrovertibile prova del valore delle sue ricerche sperimentali.

Per approfondire

Chi desideri approfondire gli studi di Lazzaro Spallanzani sui pipistrelli può, utilizzando la Rete, leggere e scaricare il saggio dato alle stampe dallo scienziato scandianese dal titolo *Lettore sopra il sospetto di un nuovo senso... nei pipistrelli...* (Torino, 1794) rintracciabile in Google libri. Non direttamente consultabile in Rete è invece l'Epistolario spallanzaniano; è necessario rivolgersi alla carta stampata e quindi alle biblioteche. Due sono le edizioni di riferimento, quella edita da Sansoni Firenze in cinque volumi a partire dal 1958 e quella, assai più recente, dell'Editore Mucchi di Modena relativa alla Edizione Nazionale delle Opere di Lazzaro Spallanzani.

Alle radici dell'ecografia (1880-1949): la “magia” del quarzo per le applicazioni belliche e civili

*Angelo Vedovelli**

Medico Internista, Assisi

Contributo presentato da Luigi Bolondi

Non c'è passato senza futuro

Anonimo

Abstract

Long before ultrasound became a cornerstone of modern diagnostics, a journey of discovery had already begun. This article retraces what can be considered the “prehistory” of medical ultrasound, focusing on the period from 1880 to 1949. Beginning with the discovery of piezoelectricity by the Curie brothers and the subsequent applications of quartz, it illustrates how military and civil needs contributed to the emergence of ultrasound imaging. The study highlights how human ingenuity and perseverance led to the development of an extraordinary diagnostic technique, which continues to evolve to this day.

Keywords

Ultrasound history, Piezoelectric quartz, Diagnostic ultrasound.

Nota esplicativa

Hz (hertz): unità di misura della frequenza delle onde sonore, indica il numero di cicli per secondo. 1 kHz = 1.000 Hz; 1 MHz = 1.000.000 Hz. Il limite tra suoni udibili e ultrasuoni è convenzionalmente fissato a 20.000 Hz (20 kHz).

© Angelo Vedovelli, 2025 / Doi: 10.30682/annalesps2503d

This is an open access article distributed under the terms of the CC BY 4.0 license

*angeve@libero.it

Introduzione

L'integrazione dell'Intelligenza Artificiale (IA) nell'*imaging* ecografico promette di potenziare le capacità diagnostiche e snellire i flussi di lavoro clinici. Un potenziale, questo, accompagnato tuttavia da sfide connesse con la effettiva implementazione nella pratica clinica. Certo è che, più ci si proietta in avanti, più il passato remoto dell'ecografia si fa nebuloso, fino ad apparire estraneo alla realtà del divenire. Scopo di questo lavoro è ripercorrere il *prima della storia* dell'ecografia fino a lambirne l'inizio. È una vicenda di Intelligenza Umana che prende avvio dall'interesse per i cristalli di due giovani ricercatori di fine Ottocento e con un percorso a zig-zag incrocia contingenze belliche e multiformi esigenze civili, e solo alla fine approda alla ispirazione di "vedere con il suono" all'interno di organismi viventi. Da lì in poi procede la *storia* della ecografia, destinata a rivoluzionare il campo della diagnostica medica più di ogni altra tecnica di indagine [1]. Ma, appunto, questa rivoluzione non nasce per generazione spontanea: è il frutto di un corpo di conoscenze ed esperienze accumulate nel tempo e che ne costituiscono il fondamento. La rievocazione che se ne fa in questo contesto ha due elementi di arbitrietà. Il primo riguarda l'arco temporale (1880-1949) scelto per delimitare il periodo delle "radici": la data di inizio – ovvero quella della scoperta del fenomeno della piezoelettricità – è perfino ovvia, mentre con la seconda ci si è fermati alle soglie degli anni Cinquanta del secolo scorso, dunque subito prima delle pionieristiche sperimentazioni della tecnica ecografica in campo clinico. Il secondo elemento è invece di ordine metodologico. La letteratura che ricorda le origini dell'ecografia è costituita da un lato da ricostruzioni molto dettagliate e ricche di riferimenti fisici e ingegneristici, pienamente apprezzabili solo da specialisti della materia, dall'altro lato da cronache troppo stringate per restituire una visione organica dello sviluppo dei fatti. Il resoconto che segue intende collocarsi a metà strada tra questi due estremi. Per tale motivo, ad un esame meticoloso non sfuggirà né l'esposizione sintetica di alcuni aspetti tecnici né, parlando di protagonisti, l'omissione di qualche comprimario. Si tratta di un compromesso per non perdere di vista un filo rosso lungo settant'anni.

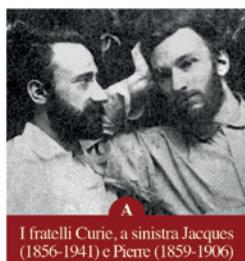
1. Dai cristalli agli icebergs

La scoperta della piezoelettricità: una questione di (a)simmetria

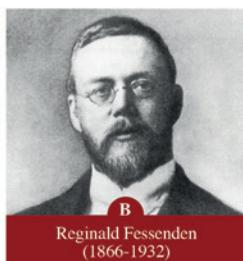
La Belle Époque segnò l'Europa non solo sul piano artistico e culturale, sociale e di costume. L'assoluta fiducia nella scienza e nel progresso di marca positivista fu terreno fertile per uno sviluppo scientifico e tecnologico senza precedenti. Tra le linee di ricerca che in quegli anni andavano progredendo in Fisica, grande impulso ebbero gli studi di mineralogia, inclusi quelli sulle relazioni tra caratteristiche geometriche e proprietà fisiche dei cristalli. Era già noto che la proprietà della tormalina e di altri cristalli di generare una carica elettrica in risposta al riscaldamento o al raffreddamento, la loro *piroeletricità*, era legata alla asimmetria della loro geometria cristallina poiché il fenomeno non si presentava con i cristalli simmetrici. Tuttavia, il meccanismo che collega gli effetti termici e quelli elettrici rimase sconosciuto fino alle ricerche sulla piroeletricità pubblicate nel 1880 dai fratelli Jacques e Pierre Curie (Fig. 1A)¹, allora poco più che ventenni e

¹ Tutte le immagini sono pubblicate a colori nell'edizione online degli *Annales*.

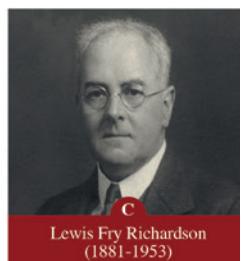
preparatori di laboratorio presso la Facoltà di Scienze di Parigi. Così scrivevano nel paragrafo di apertura del loro resoconto: “I cristalli che hanno uno o più assi con estremità dissimili, cioè i cristalli emiedrici [semi-simmetrici, *N.d.T.*] con facce oblique, possiedono la particolare proprietà fisica di generare due poli elettrici di segno opposto alle estremità degli assi suddetti in risposta ad una variazione di temperatura: è il fenomeno noto come piroelettricità. Noi abbiamo trovato un nuovo metodo di sviluppare elettricità polare in questi stessi cristalli, che consiste nel sottoporli a variazioni di pressione lungo i loro assi emiedrici” [2].



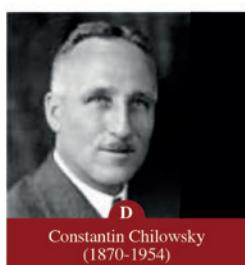
A
I fratelli Curie, a sinistra Jacques (1856-1941) e Pierre (1859-1906)



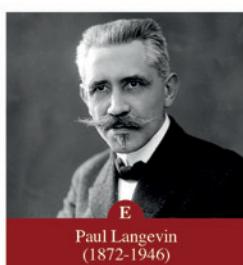
B
Reginald Fessenden (1866-1932)



C
Lewis Fry Richardson (1881-1953)



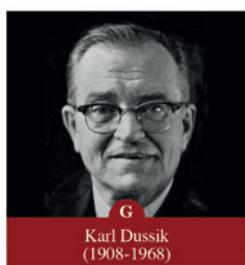
D
Constantin Chilowsky (1870-1954)



E
Paul Langevin (1872-1946)



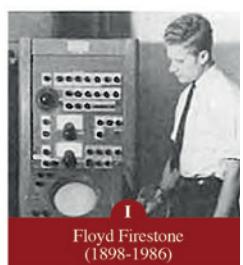
F
Sergei Sokolov (1897-1957)



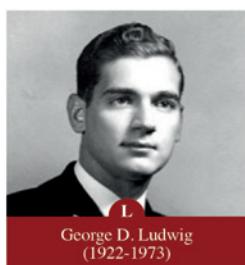
G
Karl Dussik (1908-1968)



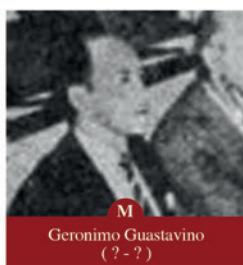
H
Wolf-Dieter Keidel (1917-2011)



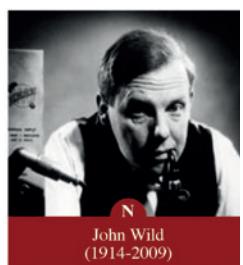
I
Floyd Firestone (1898-1986)



L
George D. Ludwig (1922-1973)



M
Geronimo Guastavino (? - ?)



N
John Wild (1914-2009)

Fig. 1. Alle radici dell'ecografia. Galleria di protagonisti.

I Curie ritenevano che l'effetto determinato da una variazione termica fosse in realtà la conseguenza di una contrazione ed espansione del cristallo in grado di dar luogo alla comparsa di cariche elettriche; secondo tale ipotesi, anche una deformazione prodotta per via meccanica avrebbe generato cariche elettriche. È per provare la correttezza di questa ipotesi che i due fratelli testarono vari tipi di cristalli asimmetrici, tra cui il quarzo (Fig. 2), ritagliando per ognuno – servendosi di un seghetto da gioielliere – una lamina secondo direzioni particolari rispetto agli assi cristallografici. La lamina era posta tra due fogli di carta stagnola con la funzione di elettrodi, collegati ad un elettrometro, e il complesso cristallo-elettrodi inserito tra le ganasce di un morsetto. I Curie avevano ragione: pressando la lamina di cristallo, l'elettrometro indicava una differenza di potenziale, segno che la compressione aveva prodotto cariche elettriche positive su una delle facce e negative su quella opposta. Anche stirandola si generava elettricità, ma con polarità invertita: l'estremità caricatasi positivamente per compressione diventava negativa; e viceversa. I Curie confrontarono questi effetti con quelli dei gradienti termici, accertando che la compressione induceva la stessa polarità del raffreddamento, e la decompressione quella del riscaldamento. In definitiva, è per fornire una spiegazione al fenomeno della piroelettricità che venne scoperta la piezoelettricità (dal greco “piézein”, comprimere). Poiché il quarzo ha elevata durezza, le deformazioni subite dalla lamina sotto sollecitazione meccanica dovevano essere dell'ordine di nanometri, o anche inferiori. Tuttavia, parlando oggi su scala atomica, erano sufficienti affinché gli atomi di silicio e ossigeno del reticolo cristallino si spostassero per frazioni di diametro molecolare, dalle loro posizioni di equilibrio in direzioni opposte, e con essi le rispettive cariche elettriche. Ne risultava una successione di dipoli “ \pm ” lungo le linee di campo elettrico, facendo sì che sulle superfici opposte della lamina comparissero cariche elettriche di segno opposto. Il risultato *macroscopico* era quello messo in luce dai Curie: ovvero la polarizzazione del cristallo (elettricamente neutro quando non deformato). Di certo, flebilissime – dell'ordine di microampere, o meno – erano le correnti elettriche generate, che tuttavia furono rilevate con gli elettrometri dell'epoca. I Curie non trascurarono di esaminare anche cristalli simmetrici, osservando che non possedevano la capacità di sviluppare elettricità polare per compressione. I due fratelli, però, non avevano previsto che i cristalli che mostravano l'effetto piezoelettrico *diretto* (elettricità da deformazione meccanica) avrebbero manifestato anche l'effetto piezoelettrico *inverso* (deformazione da applicazione di un campo elettrico). Questa proprietà fu previ-



Fig. 2. A sinistra, cristalli naturali di quarzo ialino; a destra, esemplare levigato ($5.2 \times 1,6 \times 1,6$ cm, ca.). In entrambi i casi è evidente la morfologia prismatica-esagonale con terminazioni piramidali, tipica della specie.

sta per via teorica dal fisico francese Gabriel Lippmann nel 1881, e i Curie si affrettarono a confermarla sperimentalmente [3]. Geniale il sistema da loro ideato per rilevare deformazioni del cristallo altrimenti impercettibili: al cristallo veniva applicato un campo elettrico per indurre una dilatazione che, impedita, generava una forza meccanica; questa, agendo su un secondo cristallo accoppiato meccanicamente, produceva – per effetto piezoelettrico diretto – un segnale elettrico rilevabile con un elettrometro. In altri termini, l'effetto piezoelettrico inverso fu messo in luce sfruttando l'effetto diretto. La previsione di Lippmann era brillantemente confermata.

L'affondamento dell'inaffondabile e la "soluzione acustica": l'eco

I fratelli Curie applicarono l'effetto piezoelettrico per realizzare un “elettrometro al quarzo”, strumento di laboratorio in grado di misurare deboli correnti elettriche. Sul finire del secolo, Pierre e la moglie Marie se ne servirono per rilevare le minime correnti elettriche generate dalla ionizzazione dell'aria causata da materiali radioattivi, misurando così indirettamente il loro grado di radioattività. Ma per il resto il fenomeno della piezoelettricità rimase a lungo una mera curiosità scientifica, né esso aveva cambiato di rango quando la nostra storia riprende il suo corso, nel 1912. L'impatto emotivo suscitato dall'affondamento del Titanic il 15 aprile di quell'anno in seguito alla collisione nella nebbia con un iceberg fu enorme in tutto il mondo. Perirono oltre 1500 persone, e con esse una nave che per le soluzioni tecniche d'avanguardia che adottava era ritenuta inaffondabile. La tragedia sollecitò prontamente la ricerca di un sistema capace di rilevare iceberg navigando nel buio o nella nebbia. Inviare un suono sott'acqua e ricercare un'eco di ritorno appariva “la soluzione”: registrare un'eco di rimbalzo avrebbe indicato la presenza di un ostacolo, e inoltre se ne sarebbe potuta calcolare la distanza moltiplicando la velocità del suono in acqua (che era nota) per il tempo intercorso tra l'invio del suono e la ricezione dell'eco. Ma c'erano da affrontare lacci di natura fisica e limiti di natura tecnica. Il metodo del suono-eco sviluppato nel 1913 dal fisico tedesco Alexander Behm per rilevare gli iceberg mediante la propagazione orizzontale di onde sonore si rivelò inefficace, a causa della dispersione laterale del suono. Ma ciò che non funzionò in orizzontale funzionò in verticale: grazie alla sua competenza nel misurare intervalli di tempo brevissimi, Behm riuscì a determinare la profondità del mare *sotto* una nave. La sorgente sonora era una piccola carica esplosiva fatta detonare sotto la superficie dell'acqua: l'eco riflessa dal fondale veniva captata da un microfono sul lato opposto dell'imbarcazione, il cui scafo fungeva da schermo contro il rumore dell'esplosione. Un ingegnoso “cronomicrometro” permetteva di misurare il tempo dell'eco e calcolare così la profondità [4]. Con il cosiddetto “Echolot” di Behm era nata la prima forma di *eco-scandaglio*, dopo che per secoli ci si era affidati al rudimentale scandaglio a sagola, per effettuare misure di profondità, ovvero una corda con un peso in piombo che veniva calata fino a toccare il fondo. Nel 1914, a seguito di un brevetto depositato l'anno prima [5], il fisico canadese Reginald Fessenden (Fig. 1B) testò in mare un “oscillatore” meccanico subacqueo: un disco d'acciaio di circa 75 cm di diametro e 12 mm di spessore circondato da una bobina elettronagnetica. Il passaggio di corrente alternata nella bobina generava un campo magnetico oscillante che faceva vibrare il disco avanti e indietro, causando la propagazione di onde elastiche nell'acqua. Quando colpito da onde riflesse da un iceberg, il disco tornava a vibrare, inducendo una variazione del campo

magnetico nella bobina e generando un segnale elettrico, rilevabile dall'operatore tramite cuffia telefonica. Sebbene il dispositivo si fosse rivelato in grado di rilevare iceberg fino a due miglia di distanza, l'emissione prolungata, anziché intermittente, creava interferenze con gli echi di ritorno, limitandone l'efficacia come sistema di allerta. Inoltre, il dispositivo oscillava "solo" 540 volte al secondo, e suoni con questa frequenza si propagavano per legge fisica con un fronte d'onda sferico, in tutte le direzioni. E in forma sferica ritornavano anche gli echi rimbalzati da un iceberg, segnalando un ostacolo ma senza indicarne la posizione. Solo i suoni ad alta frequenza, *gli ultrasuoni*, si irradiavano come un fascio ristretto e *direzionabile*. Ed era un'eco ottenuta solo da una direzione precisa che avrebbe permesso anche la localizzazione dell'iceberg. Consapevole di ciò, appena cinque giorni dopo il naufragio del Titanic il matematico inglese Lewis Fry Richardson (Fig. 1C) presentò domanda di brevetto per un sistema di eco-localizzazione degli iceberg basato su un fischio ad ultrasuoni, posizionato al centro di un riflettore parabolico che serviva a concentrare e dirigere il suono [6]. Ma il suo dispositivo non vide mai la luce.

2. Oltre il suono

La minaccia viene ancora dal mare

Furono ancora disastri navali a smuovere le acque della nostra storia. Tra questi, l'affondamento del transatlantico *Lusitania* da parte di un U-boat tedesco al largo dell'Irlanda nel 1915 (1198 vittime), evento che contribuì a incrinare i rapporti tra Stati Uniti e Germania e ad alimentare l'opinione pubblica a favore dell'intervento. Ma non si trattò solo del *Lusitania*. I dati dicono che l'impatto dei 375 sottomarini tedeschi durante la Prima Guerra Mondiale fu devastante. Secondo una fonte accreditata, furono affondate 7.672 navi mercantili per una stazza complessiva di oltre 15 milioni di tonnellate [7]. D'altra parte, le difese contro i sottomarini erano allora davvero esigue. Si poteva contare solo su idrofoni passivi, per captare il rumore emesso dal motore e dall'elica dei sommergibili, e sul camuffamento ottico degli scafi (*dazzle camouflage*).

Una serie di coincidenze

Se un ingegnere russo-francese non avesse avuto a disposizione tempo e contesto ambientale adatto per meditare un piano durante la convalescenza da tubercolosi in un albergo nelle Alpi svizzere, se il ministro a cui sottopose la sua idea non fosse stato un illustre matematico che ben conosceva Langevin, e se quest'ultimo non fosse stato allievo di Pierre Curie, il sonar sarebbe comunque stato inventato ma il suo sviluppo avrebbe seguito un'altra tempistica. Un esempio questo di come anche fattori casuali possano influenzare il progresso scientifico. Nel 1915 (gli U-boat erano in azione già dal settembre dell'anno precedente), Constantin Chilowsky (Fig. 1D) propone di usare gli ultrasuoni per individuare i sottomarini. Scartato il fischio meccanico suggerito da Richardson, pensa di generarli tramite una piastra di ferro laminato messa in vibrazione da un campo elettromagnetico ad alta frequenza, del tipo impiegato allora nella telegrafia senza fili. La proposta di Chilowsky passò attraverso vari ambienti accademici e diplomatici fino ad approdare sul tavolo di Paul Painlevé, ministro dell'Istruzione Pubblica e delle Invenzioni in Francia, che intuendone il potenziale la inoltrò a Paul Langevin (Fig. 1E), uno dei più brillanti fisici del tempo.

Paul Langevin: un flash

Come riprova del suo valore di scienziato basterebbe ricordare che Langevin è sepolto nel Pantheon di Parigi, che accoglie i Grandi di Francia (vi riposano anche Pierre Curie con la moglie Marie, e il già citato Painlevé). Allievo di Curie, maestro di Louis de Broglie, Langevin è tra le figure chiave della Fisica del XX secolo. Introdusse la teoria del diamagnetismo e paramagnetismo dei materiali, difese e divulgò la teoria della relatività di Einstein, di cui era intimo amico, interpretò la dilatazione temporale prevista dalla relatività (è suo il famoso “paradosso dei gemelli”). Di grande rilievo anche il suo impegno civile: pacifista convinto, antifascista e attivista politico, prese parte alla Resistenza francese sotto il regime di Vichy, venendo arrestato dalla Gestapo nel 1940. Nel 1911 scoppì uno scandalo di vasta risonanza nella stampa quando fu scoperta la relazione tra Langevin, sposato con figli, e Marie Curie, già allora famosa scienziata e vedova dopo la tragica morte di Pierre nel 1906.

L'intuizione di Langevin

Langevin non ritenne praticabile l'approccio di Chilowsky che prevedeva la generazione di ultrasuoni a partire da onde elettromagnetiche, ma si interessò al problema e si avvalse della sua collaborazione come ingegnere. Inizialmente fu realizzato un condensatore costituito da due armature metalliche separate da una lamina di mica, che impediva il passaggio di corrente tra le due. L'obiettivo era far vibrare il sistema alimentato da corrente elettrica alternata ad alta frequenza in modo da produrre onde ultrasonore. Come ricevitore degli echi si impiegò un microfono a granuli di carbone. Tuttavia, le prove presso la base navale di Tolone non diedero i risultati sperati: il sistema vibrante era poco efficiente, e i ricevitori a granuli di carbone soffrivano di forti rumori di fondo. Era escluso pensare ad un impiego per la rilevazione di sottomarini. Abbandonata l'idea, la geniale intuizione di Langevin fu di sfruttare il fenomeno piezoelettrico diretto ed inverso scoperto dai fratelli Curie, in sostanza rimasto fino ad allora nel cassetto (come sopra riferito). *Sottoponendo una lamina piezoelettrica di quarzo non ad un campo elettrico statico (come fatto dai Curie), ma ad oscillazioni elettriche ad alta frequenza, si sarebbe potuta ottenere una rapida alternanza di dilatazioni e contrazioni della lamina, trasmettendo così sott'acqua onde elastiche ad alta frequenza, cioè ultrasuoni.* Per converso, *in presenza di un ostacolo subacqueo le onde d'eco di ritorno, colpendo la lamina, avrebbero potuto provocarne una serie di deformazioni meccaniche generando segnali elettrici, amplificabili e rilevabili.* Langevin si rivolse al laboratorio di Jacques Curie (Pierre era scomparso da tempo) per ottenere lamine piezoelettriche di quarzo.

La soluzione di Langevin: un mosaico e un sandwich

Vi erano però due problemi tecnici da affrontare. Il primo: localizzare con precisione i sottomarini per poterli inseguire e colpire richiedeva un fascio ultrasonoro molto stretto, ottenibile con frequenze assai elevate. Tuttavia, all'aumentare della frequenza cresce anche l'assorbimento in acqua, riducendo la portata degli ultrasuoni. Poiché era necessario raggiungere bersagli a notevoli profondità, Langevin dovette limitare la frequenza a 40.000 Hz, il che riduceva la focalizzazione del fascio. Per compensare, sarebbe servita una *lamina piezoelettrica di quarzo sufficientemente ampia*: maggiore è la superficie emittente, più stretto risulta il fascio. Secon-

do problema: era essenziale emettere ultrasuoni di elevata intensità affinché anche gli echi di ritorno risultassero abbastanza forti da poter essere rilevati. Questo richiedeva di applicare alla lamina voltaggi altissimi, difficilmente gestibili a bordo di navi. Poiché la frequenza di risonanza propria di una lamina – quella cioè a cui vibra con la massima efficienza – dipende dal suo spessore, l’uso di una *lamina spessa* avrebbe consentito di ridurre il voltaggio necessario. Ma era pressoché impossibile ottenere da un singolo cristallo naturale di quarzo una lamina piezoelettrica che fosse abbastanza ampia e spessa, oltre che priva di difetti. Langevin trovò la soluzione. Lamelle piezoelettriche di quarzo spesse 4 mm furono ritagliate e incollate tra loro in modo da formare un mosaico circolare omogeneo di 10 cm di diametro, a sua volta incapsulato tra due piastre d’acciaio alte 3 cm, a costituire un corpo unico e compatto (Fig. 3). Era così l’intero blocco a vibrare e a trasmettere ultrasuoni in acqua, soddisfacendo i requisiti di ampiezza e spessore della sorgente. Quanto agli echi ultrasonori ricevuti dal trasduttore, i segnali elettrici da essi generati venivano amplificati e, mediante un’eterodina (oscillatore locale), convertiti in frequenze più basse, *udibili* con una cuffia telefonica [8]. Nel maggio 1918, il “Sondeur Ultrasonore” di Langevin, con trasduttore al quarzo che fungeva sia da emettitore discontinuo di onde ultrasonore che da ricevitore dei loro echi, rilevò per la prima volta un sommersibile: il francese *Messidor*, individuato a una profondità di 500 metri. *Era nato l’antenato di quello che, molti anni più tardi, sarebbe stato chiamato SONAR*, ma la fine imminente della guerra ne impedì l’impiego in teatri bellici. Va notato che le ricerche di Langevin venivano liberamente diffuse nei laboratori di altri Paesi alleati. In Gran Bretagna, quasi contemporaneamente a Langevin, anche il fisico Robert William Boyle sviluppò un dispositivo piezoelettrico al quarzo, denominato ASDIC, per la rilevazione dei sommersibili.



Fig. 3. Trasduttore risonante a sandwich di quarzo progettato da Langevin, aperto per mostrare il mosaico di lamine di quarzo interposto tra due piastre di acciaio. Esemplare appartenuto alla Marina francese, ora esposto all’ESPCI di Parigi. [Fonte: Physics Today, 75, 2022. © 2022 AIP Publishing. Riprodotta con autorizzazione per uso non commerciale]. <https://doi.org/10.1063/PT.3.5122>.

3. Tra le due guerre

Negli anni tra Prima e Seconda Guerra Mondiale si andò sviluppando uno straordinario e multiforme interesse per gli ultrasuoni. In ambito accademico si approfondì la conoscenza

della fisica delle onde ultrasonore e delle leggi che ne regolano l'interazione con la materia. Come alternativa al quarzo, che rimase la sorgente più diffusa di ultrasuoni, furono sviluppati trasduttori magnetostrettivi a base di leghe nichel-ferro capaci di vibrare sotto l'azione di un campo magnetico oscillante. Si esplorarono gli effetti degli ultrasuoni sulle reazioni chimiche e in campo biologico (azioni su cellule, tessuti, e microrganismi). In campo medico, venne inaugurata la ultrasuonoterapia che conobbe rapida e ampia diffusione nel tentativo di curare le malattie più diverse. Ma i massimi progressi si ottennero nel settore della rilevazione subacquea, migliorando la sicurezza della navigazione e rivoluzionando l'esplorazione dei fondali marini. Risalgono a quegli anni anche i primi tentativi di usare ultrasuoni per valutare l'integrità di materiali metallici, che all'epoca veniva verificata mediante raggi X ad alta intensità.

Cosa c'è sotto? Le "diagnosi" subacquee con echi ultrasonori

Negli anni Venti, il "Sondeur Ultrasonore" Langevin-Florisson, sviluppato dalla francese SCAM, inaugurerà l'uso di echi ultrasonori per misurare la profondità del mare e rilevare ostacoli sommersi. Fu installato su navi civili e militari. L'emissione ultrasonora consisteva in treni d'onda della durata di un millesimo di secondo, intervallati da brevi pause per consentire la ricezione dell'eco. L'apparecchio era dotato di un "indicatore ottico": all'invio dell'impulso, un punto luminoso si muoveva lungo una piastra di vetro verticale graduata in metri; il ritorno dell'eco ne provocava una deflessione laterale, indicando la profondità in quel momento. Fu introdotta anche una visualizzazione ottica continua, che permetteva di seguire l'andamento degli echi durante la navigazione, offrendo un monitoraggio continuo della profondità. Prodotto a partire dal 1930, l'"Echosounder" della britannica Henry Hughes & Son rappresentò un progresso significativo per l'esplorazione subacquea. Utilizzava un trasduttore a magnetostruzione che, operando alla propria frequenza di risonanza di circa 16.000 vibrazioni al secondo (poco al di sotto della soglia convenzionale degli ultrasuoni, fissata a 20.000 Hz), emetteva un fascio piuttosto largo. Questa frequenza era circa la metà di quella emessa dal Sondeur Ultrasonore Langevin-Florisson al quarzo (tra 30.000 e 40.000 vibrazioni al secondo). Il sistema offriva una maggiore penetrazione in acqua e dunque la possibilità di esplorare a elevate profondità. Un oscillografo con stilo scrivente su carta in movimento permetteva la registrazione continua degli echi (*ecogramma*), fornendo una rappresentazione permanente del profilo del fondale marino anziché limitarsi a misurazioni puntuali di profondità. Diverse spedizioni britanniche e nordamericane adottarono questa tecnologia per mappare aree inesplorate di oceani e grandi laghi. La registrazione degli echi provenienti dai fondali si rivelò essenziale anche per la posa dei cavi telegrafici sottomarini e per la ricerca di relitti sommersi. Nel 1935 un echosounder Henry Hughes installato a bordo della nave *Orphir* localizzò il relitto del *Lusitania* a 87 metri di profondità. Nel corso di rilievi subacquei capitava talvolta di registrare un misterioso "doppio fondo" tra la nave scandagliatrice e il vero fondale. Il fatto che lo strato superiore di echi salisse e scendesse fornì un chiaro indizio sulla sua reale natura: banchi di pesci in movimento. Furono queste osservazioni ad aprire la strada alla vasta applicazione della tecnica di riflessione ultrasonora nel settore della pesca.

Cosa c'è dentro? La "diagnosi" nei materiali con ultrasuoni per trasmissione

L'affermazione degli ultrasuoni come strumento di riconoscizione subacquea stimolò l'interesse per il loro impiego anche in altri contesti "diagnostici": l'analisi di pezzi metallici alla ricerca di difetti strutturali. Tuttavia, diversamente dalle grandi distanze implicate nelle rilevazioni marine, si trattava in questo caso di esplorare piccoli spessori, e le risorse tecnologiche dell'epoca non consentivano di rilevare tempi ultrabrevi di ritorno degli echi. Scelta obbligata era la tecnica di trasmissione ultrasonora. Nel 1929, il fisico sovietico Sergei Sokolov (Fig. 1F), considerato il padre dell'*ultrasonic testing*, dimostrò che gli ultrasuoni possono attraversare i materiali metallici senza assorbimento evidente, e ne propose l'impiego per individuare difetti al loro interno [9]. In uno dei sistemi da lui ideati, il campione veniva immerso in acqua e attraversato da un fascio ultrasonoro emesso da un trasduttore al quarzo sottostante. Gli ultrasuoni, dopo averlo attraversato, raggiungevano la superficie del liquido sovrastante, inducendone la vibrazione. Un fascio di luce esterno, diretto su questa superficie vibrante, veniva deviato proiettando su uno schermo rivelatore un'alternanza di bande chiare e scure. Un difetto nel materiale interrompeva la trasmissione ultrasonora in una determinata area, impedendo la vibrazione della superficie del liquido e la conseguente diffrazione della luce [10]. Un certo progresso nella ricerca di difetti nei materiali fu segnato dall'ingegnere tedesco Otto Mühlhäuser. Il suo sistema, brevettato nel 1931, utilizzava due trasduttori al quarzo: uno per emettere onde ultrasonore attraverso il materiale in esame, l'altro, posizionato sul lato opposto e collegato a un milliamperometro, per ricevere le onde trasmesse. La presenza di un difetto all'interno del materiale causava riduzione o interruzione del segnale ricevuto dal secondo trasduttore, indicando imperfezioni o discontinuità [11]. Il sistema non trovò importanti applicazioni industriali. Un ulteriore contributo all'analisi dei materiali mediante trasmissione ultrasonora fu fornito dal fisico tedesco Robert Pohlman, che nel 1939 ideò un dispositivo capace di convertire le attenuazioni del fascio ultrasonoro causate da discontinuità interne nel materiale in variazioni di intensità luminosa direttamente osservabili [12]. Il sistema, noto in seguito come *cella di Pohlman*, offriva un mezzo per "visualizzare" l'onda ultrasonora trasmessa, anticipando in forma embrionale l'imaging industriale.

4. Iperfonografo, ultrasonocardiogramma, ultrasonoscopio

La "svolta" fu segnata proprio dal tentativo di usare gli ultrasuoni per esplorare l'interno di strutture metalliche con *tecnica di trasmissione*. Negli anni Quaranta nacquero in Europa i primi tentativi di applicare lo stesso principio all'esplorazione del corpo umano. Tuttavia, i risultati si rivelarono inconcludenti. Una prima ragione fu la mancanza di un approccio multidisciplinare: le prove erano condotte in autonomia da medici dotati di qualche competenza tecnica, ma senza il supporto diretto di figure ingegneristiche. Una seconda ragione, connessa alla prima, risiedeva nei limiti tecnici delle apparecchiature allestite. Una terza, nella natura dei tessuti biologici che – a differenza dei metalli – costituiscono mezzi di propagazione del suono fortemente disomogenei e dalle configurazioni geometriche molto complesse. Il neurologo austriaco Karl Dussik (Fig. 1G), che nel 1942 presentò la "iperfonografia" del cervello, è considerato *il primo medico ad aver tentato l'uso degli ultrasuoni a scopo diagnostico*. L'apparecchiatura da lui realizzata

mirava a valutare la trasmissione di un fascio ultrasonoro attraverso il cranio. Due trasduttori al quarzo, uno emittente (0,8-1,5 MHz) e uno ricevente, erano accostati alle ossa parietali opposte del paziente, coricato supino con la testa parzialmente immersa in acqua per migliorare l'accoppiamento acustico. Il trasduttore ricevente era collegato a una lampadina la cui luminosità variava in base all'intensità del segnale ricevuto, impressionando in misura corrispondente una lastra fotografica. Dussik riteneva che, nell'attraversare le cavità liquide dei ventricoli cerebrali, gli ultrasuoni subissero minore attenuazione rispetto al tessuto circostante, raggiungendo quindi il ricevitore con maggiore intensità. Ne sarebbe derivata, sulla lastra, una rappresentazione dei ventricoli cerebrali come aree scure. Poiché i ventricoli vengono facilmente deformati da tumori cerebrali adiacenti, la distorsione della loro immagine poteva indicare una patologia [13]. Nel 1952 Dussik riferirà di aver esaminato fino ad allora 300 pazienti, "con risultati favorevoli" [14]. Ma proprio nello stesso anno arriverà il colpo di scena: ricercatori della tedesca Siemens dimostrarono che le zone scure ottenute da Dussik non rappresentavano i ventricoli cerebrali, bensì erano artefatti dovuti alla riflessione e rifrazione degli ultrasuoni contro le ossa craniche, e che immagini simili erano ottenibili in sostanza anche da un cranio privo del cervello [15]. Fu la pietra tombale sulla iperfonografia cerebrale. Nel 1947, il fisiologo tedesco Wolf-Dieter Keidel (Fig. 1H), Università di Erlangen, fu *il primo a tentare l'applicazione degli ultrasuoni allo studio del cuore*. Il suo sistema si basava sulla trasmissione ultrasonora attraverso il torace per documentare le cicliche variazioni del volume cardiaco durante le fasi di sistole e diastole. Un trasduttore magnetostrettivo emetteva ultrasuoni (57,5 kHz) dalla parete toracica posteriore mentre un trasduttore al quarzo, posizionato su quella anteriore, ne rilevava la propagazione. Le variazioni di intensità del segnale ricevuto, connesse ai cambiamenti di volume del cuore, venivano registrate su carta mobile, ottenendo un "ultrasonocardiogramma" [16]. La tecnica non ebbe alcun seguito (diverso destino attenderà il primo *eco-cardiogramma*, ottenuto da Inge Edler e Hellmuth Hertz nel 1953). Il medico francese André Dénier pubblicò nel 1946 un lavoro teorico sulla trasmissione ultrasonora, proponendo la "Ultrasoscopia". Nelle sue intenzioni sarebbe servita ad esplorare gli organi interni e a rilevare masse patologiche polmonari e addominali [17]. Il sistema da lui descritto prevedeva due trasduttori al quarzo e un oscilloscopio per visualizzare le differenze tra i segnali ultrasonori emessi e quelli trasmessi attraverso gli organi; queste differenze venivano tracciate sullo schermo sotto forma di segnali sinusoidali (figure di Lissajous). Non fece seguito alcuno sviluppo.

5. 1949: subito prima dell'inizio della "storia"

Dal 2 al 4 maggio 1949 si tenne ad Erlangen (Germania) un evento di particolare rilievo: il primo congresso internazionale dedicato a "Gli Ultrasuoni in Medicina" [18]. 321 i partecipanti, da sette Paesi europei. Settanta relazioni trattavano gli effetti biologici e terapeutici degli ultrasuoni. Solo due erano di tipo diagnostico: quelle presentate da Dussik e da Keidel che riferirono le loro esperienze con la tecnica di trasmissione (v. sopra). Nello stesso anno, dall'altra parte dell'oceano, tre coppie di pionieri – senza contatto tra loro e ciascuna formata da un medico e da un esperto in fisica o in elettronica – comunicavano i primi risultati diagnostici raggiunti mediante *riflessione* ultrasonora. L'impulso provenne dai progressi intervenuti nell'analisi dei materiali durante

la Seconda Guerra Mondiale, e resi pubblici solo dopo la fine del conflitto. Dai metalli ai tessuti biologici: si ripeteva dunque lo schema che a suo tempo aveva portato ai tentativi diagnostici con la tecnica di trasmissione, ma in un contesto tecnologico radicalmente mutato sotto la spinta delle esigenze belliche. Lo sviluppo del RADAR da parte di Stati Uniti e Gran Bretagna fu decisivo: la velocità elevatissima delle onde radio in aria (300.000 km/sec) rendeva brevissimi i tempi di ritorno degli echi riflessi da bersagli aerei. La loro rilevazione fu resa possibile dalla *adozione di circuiti elettronici veloci* e dal perfezionamento dell'oscilloscopio. L'applicazione di analoghe tecnologie al campo degli ultrasuoni – che rispetto alle onde elettromagnetiche viaggiano a velocità di gran lunga inferiori in qualunque materiale – permise di misurare con precisione *distanze minime*, segnando un cambio di paradigma nell'analisi non distruttiva dei materiali: *l'eco riflessa da difetti interni, o dalla superficie limite, consentiva valutazioni di integrità e misure di spessore*. Tra i vantaggi, rispetto alla tecnica per trasmissione, non vi era più la necessità di accedere al pezzo da lati opposti, cosa non sempre praticabile, e si cominciarono a realizzare dispositivi di dimensioni contenute, adatti all'uso sul campo. La nuova tecnologia rimase inizialmente confinata all'ambito militare (per scafi navali, corazze di carri armati). Nel settembre 1945, l'ingegnere americano Floyd Firestone (Fig. 1I), Università del Michigan – che aveva brevettato il "Supersonic Reflectoscope" già nel 1942 – ne pubblicò la prima descrizione tecnica [19]. Il dispositivo, destinato all'uso industriale, fu commercializzato negli Stati Uniti da Sperry Products. Utilizzava un unico trasduttore al quarzo che operava a 5 MHz, emettendo impulsi di 1 microsecondo (5 onde per impulso), 60 volte al secondo. Gli echi riflessi tra un impulso e l'altro venivano visualizzati sullo schermo fluorescente di un oscilloscopio in "modulazione di ampiezza" (A-mode): ogni eco appariva come un picco verticale, di ampiezza proporzionale all'intensità del segnale; la posizione del picco lungo la linea di base in movimento (asse dei tempi) ne indicava la profondità di origine [20]. In Inghilterra, l'ingegnere Donald Sproule sviluppò durante il periodo bellico il "Supersonic Flaw Detector", reso pubblico nel 1946 [21]. Commercializzato per l'uso civile dalla Henry Hughes & Son, impiegava due trasduttori al quarzo, uno per l'emissione e l'altro per la ricezione, posti entrambi sullo stesso lato del pezzo metallico da esaminare. Prima del 1950, rilevatori di difetti a impulso-eco furono realizzati anche in Germania e dal fisico Rokuro Uchida in Giappone, dove l'uso di circuiti elettronici era stato interdetto fino al 1948.

George Döring Ludwig

Alla fine della guerra, George Ludwig (Fig. 1L) prestava servizio come ufficiale medico presso il Naval Medical Research Institute di Bethesda, nel Maryland. Fu il chirurgo militare Charles Kirby, suo collega nella stessa struttura, a suggerirgli di verificare se la tecnologia ad eco usata per analizzare i materiali industriali si prestasse a rilevare la presenza di calcoli biliari. Ludwig progettò la sperimentazione con il fisico Francis Struthers. Era noto che un'eco si genera solo quando un'onda ultrasonora attraversa materiali con diversa *impedenza acustica*, ossia con differente resistenza al passaggio del suono. Dunque, formazioni litiasiche avrebbero potuto produrre echi distinti e rilevabili solo se la loro impedenza acustica fosse stata sufficientemente diversa da quella dei tessuti corporei circostanti, ma al riguardo non vi erano dati in letteratura. Poiché l'impedenza acustica di un materiale è pari al prodotto della sua densità per la velocità del suono attraverso di esso, Ludwig e Struthers determinarono questi due parametri su cam-

pioni di vari organi di cani e suini, e rispettivamente in una serie di calcoli biliari umani ottenuti come materiale operatorio (per inciso, nei tessuti molli fu misurata una velocità media del suono di 1540 m/sec, valore ancora oggi standard in ecografia). Le misurazioni di impedenza indicarono nei tessuti un valore medio di $1,6 \times 10^5$ (g/cm²/sec), mentre per i calcoli fu osservato un *range* tra $1,15$ e $2,42 \times 10^5$ (g/cm²/sec): una differenza che lasciava intravedere la possibilità di rilevarli mediante echi ultrasonori. Per verificarlo, Ludwig inserì due calcoli umani di 7 e 10 millimetri nella colecisti di un cane di grossa taglia. Una volta guarita la ferita chirurgica, utilizzando un metalloscopio al quarzo prodotto dalla Sperry per controlli industriali (2.5 MHz), Ludwig riuscì a rilevare sullo schermo dell'oscilloscopio gli echi dei calcoli, visualizzati in A-mode come due picchi verticali. Si trattava della *prima diagnosi ecografica eseguita su un organismo vivente*, sia pure animale. L'intera ricerca fu declassificata solo nel giugno 1949 [22], e divulgata l'anno seguente su un magazine tecnico-industriale [23]. Sebbene il compito di Ludwig fosse facilitato dal sapere cosa e dove cercare, nel suo resoconto egli osservava che “segnali più piccoli provenienti dall'area rendono l'interpretazione piuttosto difficile”. Fu probabilmente a causa di queste difficoltà discriminatorie che Ludwig decise di non sviluppare ulteriormente la tecnica per riflessione, orientandosi invece verso la trasmissione ultrasonora. Nel 1949 si trasferì al Massachusetts General Hospital di Boston collaborando con ricercatori del MIT alla diagnosi dei tumori cerebrali mediante trasmissione trans-cranica degli ultrasuoni, secondo l'approccio ideato anni prima da Dussik. Senonché, come ricordato, nel 1952 uno studio “tranchant” di ricercatori tedeschi pose definitivamente fine a questo filone di ricerca.

Jérónimo Guastavino

In Argentina, contemporaneamente a Ludwig, anche il medico Jérónimo Guastavino (Fig. 1M) e Rogelio McLoughlin, ingegnere presso la filiale locale della società elettronica americana RCA, si interessavano alla diagnosi mediante echi ultrasonori. Anziché ricorrere a rilevatori di difetti industriali, già disponibili in commercio, allestirono una propria apparecchiatura assemblando i componenti necessari: un trasduttore al quarzo per l'emissione ultrasonora e la ricezione degli echi, l'oscillatore di impulsi elettrici ad alta frequenza, un'unità di amplificazione del segnale, un oscilloscopio con presentazione A-mode e un circuito di sincronizzazione. Nell'agosto 1949 essi pubblicarono i risultati ottenuti con il loro “LUPAM” (Localizador Ultrasonoscópico Para Aplicaciones Médicas) [24]. Impiegando la frequenza di 1.5 MHz, furono rilevati echi da un calcolo che era stato inserito all'interno di un rene escluso. Fu anche riferito di echi provenienti – *in vivo* – dalle ossa dell'avambraccio e dalle pareti cardiache. Nel loro lavoro Guastavino e McLoughlin speculavano inoltre sulla possibilità di migliorare l'efficacia diagnostica superando la semplice presentazione A-mode degli echi riflessi. A tal proposito richiamavano quanto avvenuto nel campo del RADAR, dove la visualizzazione degli echi aveva compiuto nel frattempo un salto qualitativo passando dalla traccia A-mode alla presentazione PPI (Plan Position Indicator), capace di restituire una immagine bidimensionale dell'area esplorata: concetto che anticipava – *in nuce* – il principio dell'imaging ecografico B-mode. È un dato di fatto, tuttavia, che a parte qualche sporadica comunicazione riguardo al LUPAM, da allora si perdono le tracce dei due ricercatori. Di Guastavino si sa soltanto che divenne un cardiochirurgo di una certa fama in Argentina.

John Julian Wild

L'inglese John Wild (Fig. 1N) dimostrò fin da giovane uno spirito inventivo. All'età di 14 anni brevettò una valvola automatica per distribuire uniformemente acqua calda e fredda durante il riempimento di una vasca da bagno. Durante la guerra, a causa della carenza di benzina, realizzò un impianto a gas in miniatura alimentato a carbone, montato sul sidecar di una vecchia motocicletta Harley-Davidson, il cui motore era stato modificato per funzionare con il monossido di carbonio prodotto dal dispositivo. Laureatosi in Medicina nel 1942, Wild si interessò ai quadri di distensione intestinale acuta (ileo paralitico), spesso fatali, causati dall'onda d'urto dei bombardamenti aerei tedeschi su Londra. Ipotizzò che la diagnosi potesse giovarsi della misurazione dello *spessore* delle pareti intestinali. Pare sia stato Donald Sproule – già ricordato come sviluppatore del “Supersonic Flaw Detector” e con cui Wild era entrato in contatto – a suggerirgli di usare gli ultrasuoni per questo scopo. Tuttavia, gli strumenti impiegati per i test non distruttivi nei metalli operavano a frequenze troppo basse (tipicamente 1-2,5 MHz) per garantire il dettaglio richiesto per misurare le pareti intestinali. Sarebbero occorse brevissime lunghezze d'onda, ottenibili solo con frequenze più elevate. Trasferitosi negli Stati Uniti nel 1946, Wild continuò ad occuparsi del tema della distensione acuta dell'intestino presso il Dipartimento di Chirurgia dell'Università del Minnesota, a Minneapolis. Caso volle che la vicina base aero-navale disponesse di un apparato ad ultrasuoni usato in tempo di guerra per addestrare i piloti di aereo all'uso del RADAR. Il dispositivo, basato su un trasduttore al quarzo, generava un fascio ultrasonoro che simulava quello – ben più veloce – di un radar aereo. I piloti si esercitavano a “volare” sopra una vasca d'acqua che copriva una mappa in scala di territori nemici, interpretando gli echi di ritorno sullo schermo di un oscilloscopio A-mode. Fu per Wild una fortunata coincidenza il fatto che il sistema operasse a una frequenza molto elevata, ideale per i suoi studi di misurazione dello spessore del tessuto intestinale. Oltre all'accesso alla apparecchiatura, coperta ancora da segretezza militare, Wild ottenne la preziosa collaborazione tecnica dell'ingegnere Donald Neal, in servizio presso la base. Fu così preparato un contenitore d'acqua alla cui base era fissato il trasduttore al quarzo. Quest'ultimo operava alla frequenza di 15 MHz, e produceva impulsi della durata di mezzo microsecondo (7,5 onde per impulso). Una sottile membrana di gomma ricopriva l'apertura del contenitore, e sopra di essa vennero disposti – uno sull'altro – tre brevi tratti di parete intestinale, di diverso spessore, prelevati dal tenue di un cane appena sacrificato. Come risultato, Wild e Neal osservarono sullo schermo dell'oscilloscopio i picchi A-mode degli echi riflessi dalle interfacce tra i campioni: ognuno chiaramente identificabile; gli intervalli tra i picchi sulla linea di base rappresentavano lo spessore di ciascun campione (Fig. 4). *Era stato scoperto che impulsi ultrasonori potevano venire riflessi da tessuti viscerali, e non solo da calcoli.* Non fu meno



Fig. 4. Gli echi A-mode che Wild e Neal rilevarono da tre tratti sovrapposti di parete di intestino tenue di cane. Gli intervalli tra i picchi sulla linea di base (visibile come linea tratteggiata orizzontale al centro della figura) indicano i relativi spessori [da Ref. 26, © 1950 Elsevier. Reproduced under STM Permissions Guidelines with proper acknowledgment].

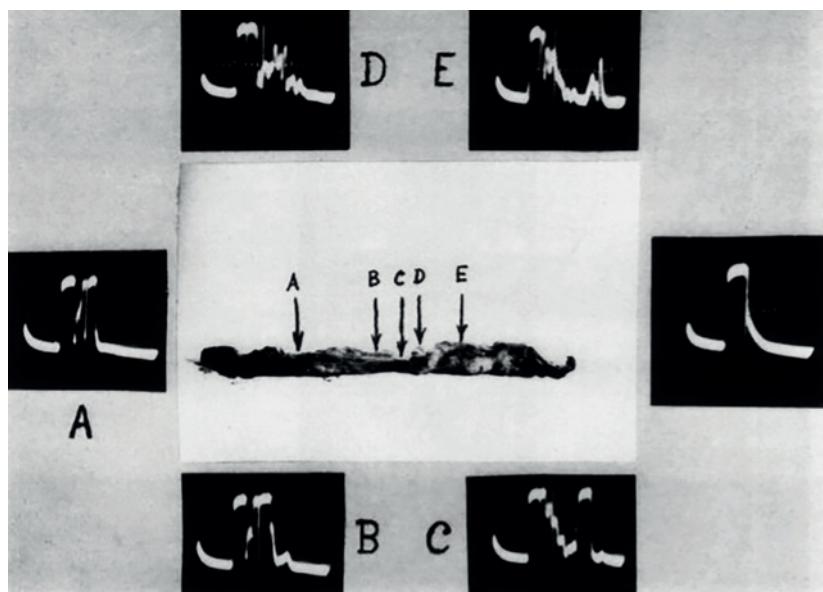


Fig. 5. Pezzo operatorio di parete gastrica con ulcera carcinomatosa. Le lettere (A-E) indicano i punti di rilevazione degli echi A-mode riportati nei riquadri. Si osserva un progressivo ampliamento dell'intervallo tra gli echi, che aumenta dalla zona normale (A) a quelle infiltrate e tumorali (B-E), indicativo di un rallentamento nella propagazione ultrasonorica [da Ref. 26, © 1950 Elsevier. Reproduced under STM Permissions Guidelines with proper acknowledgment].

cruciale quanto emerse dall'esame di un pezzo operatorio fresco di stomaco umano contenente un'ulcera carcinomatosa: *gli echi provenienti dal tumore differivano da quelli del tessuto normale nello stesso campione.* I tracciati A-mode mostravano infatti, in corrispondenza del tumore, un allargamento dell'intervallo tra gli echi sulla linea di base, attribuito a un rallentamento della propagazione ultrasonora per maggiore densità tissutale. Inoltre, dalla stessa area provenivano numerosi echi aggiuntivi, indizio della presenza di molteplici superfici riflettenti all'interno del tessuto neoplastico. Non meno rilevante, lo stesso pattern si riscontrava anche in zone adiacenti al tumore – apparentemente normali sia all'ispezione che alla palpazione – suggerendo una possibile infiltrazione neoplastica (Fig. 5). Come corollario di queste ricerche, Wild abbozzò lo schema di un trasduttore ecografico da inserire nel tubo gastroenterico per esplorarne dall'interno la parete *in vivo*: un'applicazione che anticipava di decenni l'avvento della eco-endoscopia. Nel 1949, questi risultati furono formalizzati in un report interno all'Università del Minnesota [25] e sottoposti il 15 novembre a *Surgery*, che li pubblicò tre mesi più tardi [26]. In chiusura dell'articolo, Wild commentava come “l'impiego degli ultrasuoni faceva sperare di poter rilevare tumori molto prima di qualunque metodo radiologico”. Non si pecca di enfasi affermando che *stava nascendo l'ecografia medica.* Concedendoci un rapido blitz nei primissimi anni Cinquanta – appena oltre il limite temporale di questo lavoro – fu ancora Wild, nel 1951, a firmare il primo studio in assoluto sull'applicazione diagnostica degli echi ultrasonori in campo umano *in vivo*, descrivendo differenze tra i tracciati A-mode di neoformazioni benigne e maligne in donne con tumefazioni mammarie *clinicamente palpabili* e sottoposte a biopsia. Per l'esame fu realizzato un trasduttore di pochi centimetri “che può essere tenuto in mano e spostato sopra la pelle come

la testina di uno stetoscopio” [27]. L’anno successivo presentò le prime, seppur rudimentali, immagini bi-dimensionali di tumori nella storia della ecografia [28]. Il decennio che si apriva vedrà apporti decisivi da parte di pionieri in varie parti del mondo – dagli Stati Uniti all’Inghilterra, dalla Svezia al Giappone – compreso ancora Wild anche se il suo contributo fu all’epoca largamente ignorato, soprattutto dall’ambiente accademico americano. Uomo di primati, Wild comparirà anche nel “Guinness Book of Records” per il super-risarcimento di 16,8 milioni di dollari (poi ridotto) che gli fu riconosciuto nel 1972 dal tribunale del Minnesota per diffamazione e interferenza professionale [29]. Come ricordato in un necrologio, John Wild fu uomo dal carattere difficile, spesso in conflitto con colleghi e istituzioni [30]. Ma resta, indiscussa, la sua figura di “padre” dell’ecografia medica, a cui far risalire legittimamente l’inizio della “storia”.

Tab. 1. Modalità di imaging con ultrasuoni.

Tecnologia	Descrizione sintetica	Stato
Ecografia B-mode	Immagini bidimensionali di strutture corporee	Standard clinico
Elastografia	Misura la rigidità dei tessuti	Uso clinico consolidato
Ecografia con mezzo di contrasto (CEUS)	Microbolle per migliorare la visualizzazione vascolare e caratterizzare lesioni	Uso clinico consolidato
Ecografia Doppler (Color/Power)	Visualizza e quantifica il flusso ematico	Uso clinico consolidato
Ecografia 3D/4D	Immagini volumetriche dei tessuti	Uso clinico consolidato
Ecografia multiparametrica	Combina B-mode, Doppler, elastografia, CEUS	Uso clinico avanzato
Fusion Imaging	Fusione di immagini ecografiche con TC/RM/PET	Uso clinico avanzato
Ecografia ad alta frequenza	Imaging superficiale ad altissima risoluzione (30-100 MHz)	Uso clinico specialistico
Ecografia portatile IA-assistita	Strumenti tascabili con analisi e diagnosi automatica	Uso clinico emergente
Ecografia ultrafast (UFFI)	Acquisizione di migliaia di immagini/sec. per imaging dinamico e funzionale	Uso clinico emergente
Vector flow imaging (VFI)	Analisi multidirezionale del flusso sanguigno	Uso clinico emergente
Ecografia funzionale cerebrale (fUS)	Analisi del flusso sanguigno cerebrale ad alta sensibilità	Uso clinico emergente
Ecografia molecolare	Microbolle mirate a target molecolari per imaging a livello cellulare	Sperimentale avanzato
Ecografia quantitativa (QUS)	Analisi quantitativa delle caratteristiche acustiche dei tessuti	Sperimentale avanzato
Ecografia ad apertura sintetica (SAU)	Immagini ad alta risoluzione tramite elaborazione avanzata dei segnali	Sperimentale avanzato
Ecografia acusto-ottica (AOI)	Combina ultrasuoni e luce laser per imaging ad altissima risoluzione	Sperimentale iniziale
Ecografia foto-acustica (PAI)	Ultrasuoni generati dai tessuti tramite impulsi laser per imaging ad alto contrasto	Sperimentale avanzato

Epilogo

La Tab. 1 offre una panoramica dello sviluppo attuale dell'imaging ultrasonoro, dalle applicazioni routinarie a quelle ancora in fase di studio. A così tanti decenni dalla sua nascita, l'ecografia non solo continua ad evolversi, ma lo fa con un ritmo sorprendente. Benché ogni previsione sul futuro porti con sé un margine di incertezza, è lecito ipotizzare che entro il prossimo decennio un tipo di tabella simile subirà modifiche significative: nuove applicazioni potrebbero affacciarsi, altre avanzare oltre l'attuale fase sperimentale. È altresì plausibile che l'implementazione di algoritmi di IA, anch'essa in continua evoluzione, avrà un impatto crescente. Per dirla con una immagine, si tratta di potenziare l'ecografia – nata dal quarzo, che è biossido di silicio – con la capacità del silicio monocristallino di plasmare algoritmi intelligenti. Ma l'integrazione della IA nella diagnostica ecografica presenta sfide specifiche rispetto ad altre modalità di imaging come TC e RM: l'ecografia è un esame in tempo reale, fortemente dipendente dall'operatore e dalla qualità dell'acquisizione delle immagini, che può variare sensibilmente da caso a caso e rende complessa l'applicazione uniforme di algoritmi di IA. Per quanto riguarda il quarzo, il protagonista della nostra *preistoria*, intorno alla metà degli anni Cinquanta andò in pensione, sostituito da materiali piezoelettrici più performanti. In pensione, intendiamoci, dal campo ecografico: perché – a parte gli snob che preferiscono orologi a movimento meccanico – quasi tutti nel mondo portano al polso il quarzo piezoelettrico di Curie.

Bibliografia

1. Bolondi, L. *50 anni di ultrasuoni in Medicina. La vera rivoluzione diagnostica*. Accademia delle Scienze dell'Istituto di Bologna. Bologna, 16 dicembre 2024. <https://site.unibo.it/accademiascienzebologna/it/agenda/50-anni-di-ultrasuoni-in-medicina>.
2. Curie, J.; Curie, P. Développement, par pression, de l'électricité polaire dans les cristaux hémidièbres à faces inclinées. *Compt. Rend. Acad. Sci.* 1880, 91, 294-295.
3. Curie J.; Curie P. Contractions et dilatations produites par des tensions dans les cristaux hémidièbres à faces inclinées. *Compt. Rend. Acad. Sci.* 1881, 93, 1137-1140.
4. Behm, A. *Einrichtung zur Messung von Meerestiefen und Entferungen und Richtungen von Schiffen oder Hindernissen mit Hilfe reflektierter Schallwellen*. Deutsches Reichspatent 282009. Filed 21 July 1913. Issued 13 February 1915.
5. Fessenden, R.A. *Method and Apparatus for Submarine Signaling*. U.S. Patent 1207388. Filed 29 January 1913. Issued 5 December 1916.
6. Richardson, L.F. *Apparatus for Warning a Ship of its Approach to Large Objects in a Fog*. British Patent 191209423A. Filed 20 April 1912. Issued 6 March 1913.
7. Uboat.net <https://uboot.net/ww1/boats/> (consultato 10 aprile 2025).
8. Langevin, P. *Improvements relating to the emission and reception of submarine waves*. British Patent, 145, 691. Filed 30 June 1920. Issued 28 July 1921.
9. Sokolov, S.J. Zur Frage der Fortpflanzung ultraakustischer Schwingungen in verschiedenen Körpern. *Elektr. Nachr. Tech.* 1929, 6, 454-461.

10. Sokolov, S.J. Über die praktische Ausnutzung der Beugung des Lichtes an Ultraschallwellen. *Phys. Z.* 1935, 36, 142-144.
11. Mühlhäuser, O. *Verfahren zur Zustandsbestimmung von Werkstoffen besonders zur Ermittlung von Fehlern darin*. Deutsches Reichspatent 569598, 1931.
12. Pohlman, R. Über die Möglichkeit einer akustischen Abbildung in Analogie zur optischen. *Z. Phys.* 1939, 113, 697-702.
13. Dussik, K.T. Über die Möglichkeit, hochfrequente mechanische Schwingungen als diagnostisches Hilfsmittel zu verwenden. *Z. ges. Neurol. Psych.* 1942, 174, 153-168.
14. Dussik, K.T. Weitere Ergebnisse der Ultraschalluntersuchung bei Gehirnerkrankungen. *Acta Neurochir.* 1952, 2, 379-401.
15. Guttner, W.; Fiedler, G.; Patzold, J. Über Ultraschallabbildungen am menschlichen Schädel. *Acustica* 1952, 2(4), 148-156.
16. Keidel, W.D. Über die Verwendung des Ultraschalls in der klinischen Diagnostik. *Arztl. Forsch.* 1947, 1(9), 349-354.
17. Dénier, A. Ultrasonoscopie. *Compt. Rend. Acad. Sci.* 1946, 222, 785-787.
18. Der Ultraschall in der Medizin. Kongreßbericht der Erlanger Ultraschall-Tagung 1949. S. Hirzel Verlag: Zürich, 1949.
19. Firestone, F.A. The Supersonic Reflectoscope for interior inspection. *Metal Progress* 1945, 48(3), 680-684.
20. Firestone, F.A. The Supersonic Reflectoscope, an instrument for inspecting the interior of solid parts by means of sound waves. *J. Acoust. Soc. Am.* 1946, 17(3), 287-299. <https://doi.org/10.1121/1.1915605>.
21. Sproule, D. The detection of cracks in steel by means of supersonic waves. *J. Iron Steel Inst.* 1946, 154, 319P-353P.
22. Ludwig, G.D. Considerations underlying the use of ultrasound to detect gallstones and foreign bodies in tissue. Bethesda, MD: Naval Medical Research Institute, 1949. Report No. AD 657 255.
23. Ludwig, G.D.; Struthers, F.W. Detecting gallstones with ultrasonic echoes. *Electronics* 1950, 23, 172-175.
24. McLoughlin, R.P.; Guastavino, G.N. LUPAM: Localizador ultrasonoscópico para aplicaciones médicas. *Bol. Tr. Soc. Argent. Cir.* 1949, 10, 303-344.
25. Wild, J.J. Report on the use of ultrasonic pulses for the measurement of biological tissues. Minneapolis: Department of Surgery, University of Minnesota, November 1949.
26. Wild, J.J. The use of ultrasonic pulses for the measurement of biological tissues and the detection of tissue density changes. *Surgery* 1950, 27, 183-188.
27. Wild, J.J.; Neal, D. Use of high-frequency ultrasonic waves for detecting changes of texture in living tissues. *Lancet* 1951, 257, 655-657. doi: 10.1016/S0140-6736(51)92403-8.
28. Wild, J.J.; Reid J.M. Application of echo-ranging techniques to the determination of structure of biological tissues. *Science* 1952, 115, 226-230. doi: 10.1126/science.115.2983.226.
29. Guinness Book of Records, 1989, 390.
30. Watts, G. Obituaries. John Wild: inventor of diagnostic ultrasound in medicine. *BMJ* 2009, 339, b4428. <https://doi.org/10.1136/bmj.b4428>.

Principali opere e rassegne consultate

- International Hydrographic Bureau. *A summary of Echo-Sounding Apparatus*. Monaco, 1939.
- Biquard, P. *Les ultrasons*. Presses Universitaires de France: Paris, 1948.
- Uglietti, G.A. *Gli ultrasuoni*. Ulrico Hoepli: Milano, 1952.
- Dognon, A. *Les ultrasons et leur applications*. Presses Universitaires de France: Paris, 1953.
- Busilacchi, P; Vedovelli, A. *Storia dell'Ecografia Medica*. Idelson-Gnocchi: Napoli, 1994.
- Tichý, J.; Erhart, J.; Kittinger, E.; Přívratská, J. Principles of Piezoelectricity. In *Fundamentals of Piezoelectric Sensorics*, 1-14. Springer: Berlin, 2010.
- Katzir, S. The discovery of the Piezoelectric Effect. In *The Beginnings of Piezoelectricity: A Study in Mundane Physics*, ed. S. Katzir. Springer: Dordrecht, 2006. (Boston studies in philosophy of science, vol. 246), 15-64.
- Graff, K.F. A History of Ultrasonics. In *Physical Acoustics: Principles and Methods*, vol. 1, ed. W.P. Mason. Academic Press: New York, 1964, 1-75.
- Branca, F.P. La piezoelettricità. In *Fondamenti di Ingegneria Clinica, vol 2: Ecotomografia*, ed. F.P. Branca. Springer-Verlag Italia: Milano, 2008, 45-109.
- Wille, P.C. Alternatives to Imaging the Sea by Sound and First Acoustic Trials. In *Sound Images of the Ocean in Research and Monitoring*, ed. P.C. Wille. Springer: Berlin, 2005, 7-19.
- Merril, J. Submarine Bells to Sonar & Radar: Submarine Signal Company (1901-1946), Part I. *The Submarine Review*, October 2002.
- Duck, F. Ultrasound - The First Fifty Years. *Med. Phys. Int.* 2021, 9 (SI-5), 470-498.
- Dietrich, C.F.; Bolondi, L.; Duck, F.; Evans, D.H.; Ewertsen, C.; Fraser, A.G.; Gilja, O.H.; Jensen, C.; Merz, E.; Nolsoe, C.; Nürnberg, D.; Lutz, H.; Piscaglia, F.; Saftoiu, A.; Vilmann, P.; Dong, Y.; Hill, C.R. K. History of Ultrasound in Medicine from its birth to date (2022). *Med. Ultrason.* 2022, 24(4), 434-450. <https://doi.org/10.11152/mu-3757>.
- Kaproth-Joslin, K.A.; Nicola, R.; Dogra, V.S. The history of US: from bats and boats to the bedside and beyond: RSNA Centennial Article. *Radiographics* 2015, 35(3), 960-970. <https://doi.org/10.1148/radio.2015140300>.
- Klein, E. Some Background History of Ultrasonics. *J. Acoust. Soc. Am.* 1948, 20(5), 601-604. doi:10.1121/1.1906413.
- Woo, J.S.K. A Short History of the Development of Ultrasound in Obstetrics and Gynecology. *Ob-Ultrasound.net*. 1998. <https://www.ob-ultr.asound.net/history.html> (consultato 26 marzo 2025).
- Hill, C.R.; Duck F.A. *EFSUMB History of Ultrasound: United Kingdom*. ed. C.F. Dietrich <https://efsumb.org/wp-content/uploads/2021/11/HistoryofUltrasound-UK-1.pdf>.
- Lutz, H; Nürnberg, D. *EFSUMB History of Ultrasound: Germany*. ed. C.F. Dietrich <https://efsumb.org/wp-content/uploads/2021/11/HistoryofUltrasound-Germany-1.pdf>.
- Lochak, G. Pierre Curie et la symétrie. *Séminaire de Philosophie et Mathématiques, Le centenaire du grand article de Pierre Curie sur la symétrie*. n.1, 1995, 1-16. https://www.numdam.org/article/SPHM_1995__1_A1_0.pdf.
- IEEE Engineering and Technology History. *Milestone-Proposal: Sonar, 100th Birthday of Paul Langevin Invention 1917-2017*. <https://ieemilestones.ethw.org/Milestone-Proposal:->

Sonar,_100th_birthday_of_Paul_Langevin_Invention_1917-2017 (consultato 11 febbraio 2025).

IEEE Engineering and Technology History. *Milestones: Invention of Sonar, 1915-1918*. https://ethw.org/Milestones:Invention_of_Sonar,_1915-1918 (consultato 18 febbraio 2025).

Duck, F. Paul Langevin, U-boats, and ultrasonics. *Physics Today* 2022, 75(11), 42-48.

Szabo, T.L. *Diagnostic Ultrasound Imaging: Inside Out*. 2nd ed., 1-28. Academic Press, Oxford, 2014.

Rajamani, A.; Bharadwaj, P.A.; Hariharan, S.; Ragavan, A.V.; Hassan, A.; Arvind, H.; Huang, S. A Historical Timeline of the Development and Evolution of Medical Ultrasound. *J. Clin. Ultrasound* 2024, 52(9), 1419-1437.

Woloshyn, I. Industrial ultrasonics in the USSR. *Ultrasonics* 1963, 1, 14-26.

L'ingegneria mineraria nelle Università italiane: dall'epoca moderna alla società contemporanea

*Paolo Macini, Ezio Mesini**

Dipartimento di Ingegneria civile, chimica, ambientale e dei materiali, Alma Mater Studiorum - Università di Bologna

*Accademico benedettino

Abstract

This study aims to identify the origins and development of mining engineering in European societies in the modern and contemporary eras and, subsequently, its diffusion in Italian academies and universities as a tool for the transmission and creation of scientific and technological knowledge. The creation and approval of a degree in Mining Engineering in the Italian university was a difficult and slow process, at least compared to other European Countries. After the unification of Italy, and for the following 50 years, engineering studies favoured a multi-purpose training, with little attention to specialisations. The turning point came only after the 1920s, with the establishment of a specific degree in mining engineering in selected universities. Today's society, which has as its founding paradigm the complexity, the interconnection and the dizziness of immediate communication, cannot forget its roots: a culture without memory is not open to the future, because history is awareness.

Keywords

Mining engineering, Geosciences, University history, Raw materials, Energy

1. Introduzione

Questo studio si propone di identificare le origini e lo sviluppo dell'ingegneria mineraria nelle società europee dell'epoca moderna e, in seguito, la sua diffusione nelle Università italiane come strumento di trasmissione del sapere e di sviluppo di nuove conoscenze. Se non è facile definire con precisione cosa sia un ingegnere (e ciò può essere specificato solo relativamente a un certo periodo storico), ancor meno è seguire la storia, tortuosa e variegata, che ha caratterizzato la trasmissione di questo sapere, anche in termini di narrativa e di interconnessione con le Scienze sociali. È un obiettivo complesso, perché lo si può affrontare secondo approcci diversi, quali la riflessione storiografica, il dialogo con le altre scienze, il significato epistemologico dei prodotti della ricerca, l'evoluzione della tecnica rispetto allo sviluppo della complessità sociale, la ricerca storica sui metodi e le contaminazioni disciplinari, o la tradizione degli insegnamenti. La società attuale, che ha come paradigma fondante la complessità, l'interconnessione e la vertigine della comunicazione immediata, non può dimenticare le sue radici: una cultura senza memoria non è aperta al futuro, perché la storia è prima di tutto consapevolezza.

Il termine ingegneria mineraria indica il complesso di pratiche, teorie, scienze e tecnologie impiegate per l'estrazione, il trasporto e il trattamento delle materie prime minerali solide, liquide o gassose, energetiche o non energetiche. Caratteristica dell'ingegneria mineraria è la sua interdisciplinarietà con diversi settori tecnologici, quali metallurgia, preparazione dei minerali, chimica industriale, meccanica delle macchine, meccanica delle rocce, elettrotecnica, idraulica, meccanica dei fluidi del sottosuolo, topografia, geologia, mineralogia, geotecnica, geofisica, ecc. Storicamente, la formazione dell'ingegnere minerario è sempre stata terreno di convergenza e intersezione di vari saperi, privilegiando gli aspetti pratici della professione.

L'origine della cultura mineraria europea si è sviluppata tra il XIV e il XVI secolo, quando nel continente divenne preminente la produzione dei metalli preziosi e di quelli non ferrosi: stagno, rame, piombo e zinco (Brianta, 1997). Lo sviluppo più decisivo si ebbe però tra il 1600 e il 1800, per incrementare e razionalizzare la produzione di ferro e carbone, i protagonisti della prima rivoluzione industriale. La fusione del ferro in altiforni alimentati da carbon coke metallurgico, che sostituì la produzione del ferro fucinato a mano, ricco di scorie e meno resistente, fu industrializzata in Inghilterra nel primo decennio del 1700. Nello stesso periodo, la produzione mineraria ebbe un decisivo impulso grazie all'invenzione della macchina vapore di Savery-Newcomen (1712) che, accoppiata alle pompe già sviluppate nel XVI secolo permise un rapido e facile drenaggio delle miniere, consentendo di aumentare la profondità di sfruttamento di giacimenti prima inarrivabili (Macini, Mesini, 2004).

Agli inizi del 1700, nelle aree comprese tra Sassonia e Ungheria, si ebbe la rifioritura della *bergbaukunde*, termine germanico che si può tradurre in "arte mineraria", denominazione che ha sempre caratterizzato la materia d'insegnamento fondamentale dell'ingegneria mineraria italiana (dove *ars* va inteso nel significato latino di "tecnica"). Qui, a partire dal basso medioevo, la produzione di metalli preziosi era stata un'attività preminente. In quest'ambito, e proprio in queste aree, nella prima metà del 1500 Georgius Agricola ricompose i frammenti di un sapere pratico di lunga tradizione, gettando le basi dell'ingegneria mineraria moderna

(Macini, Mesini, 2003). Le sue conoscenze, ricavate dall'esperienza e dall'osservazione degli oggetti naturali e degli impianti tecnici, sono esposte in maniera brillante in due opere, il *Bermannus* (1530) e il *De Re Metallica* (1556), i capostipiti della cultura mineraria europea.

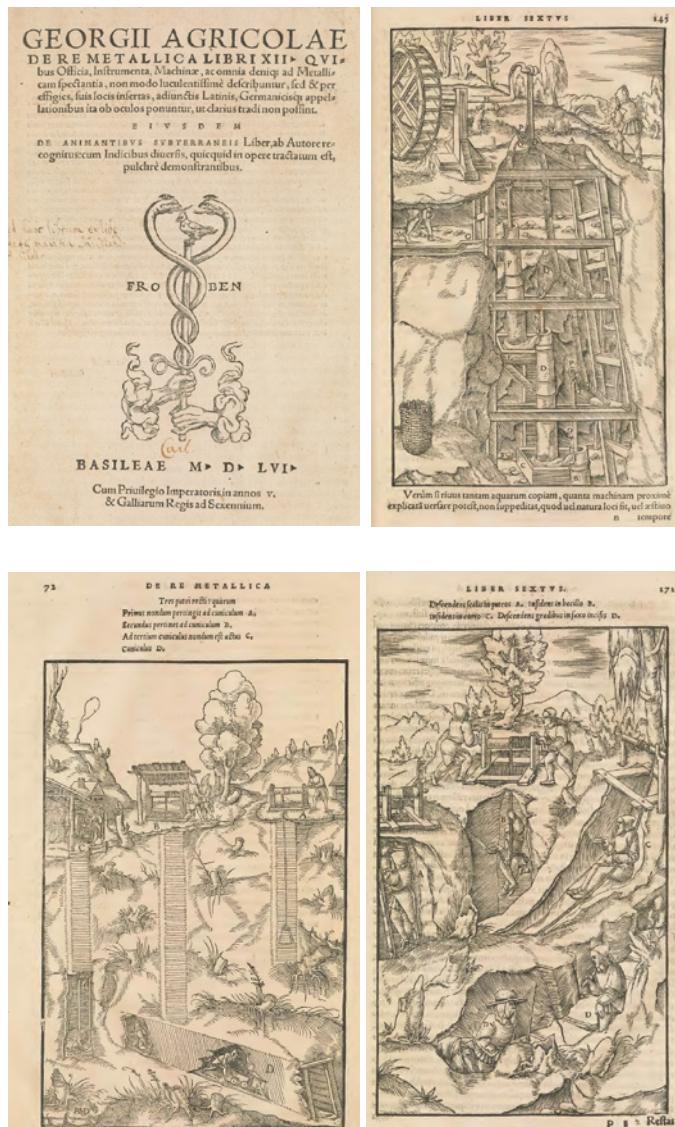


Fig. 1. Frontespizio del trattato di Georgius Agricola, *De re metallica* (1556), unito ad alcune delle quasi 300 tavole che corredano il volume: scavo di gallerie minerarie, macchine per l'eduzione delle acque e modi di accesso al sottosuolo (copia digitale da Smithsonian libraries, <https://archive.org/details/georgiagricola00agria>).

Il *De Re Metallica* (Fig. 1)¹ è un documento che testimonia le conoscenze tecnologiche del XVI secolo, e mostra non solo le conquiste dell'ingegneria, ma illustra anche modi, forme e tempi

¹ Tutte le immagini sono pubblicate a colori nell'edizione online degli *Annales*.



Fig. 2. Frontespizio del trattato di Biringuccio *De la Pirotechnia* (1540). Meno ricco di tavole rispetto al *De Re Metallica* di Agricola, il testo contiene alcune illustrazioni relative all'arte mineraria e metallurgica. A destra, in basso: estrazione del minerale da una galleria e trasporto presso le officine metallurgiche; a destra, in alto: lavaggio e arrostimento del cinabro per la produzione del mercurio (copia digitale da Smithsonian libraries, <https://library.si.edu/digital-library/book/delapirotechnial00biri>).

della circolazione delle conoscenze, nonché il rapporto tra crescita culturale, sviluppo delle attività industriali ed evoluzione dei sistemi produttivi. Qui Agricola espone in maniera sistematica le sue osservazioni sui giacimenti minerali, le tecniche per la loro ricerca, coltivazione e metallurgia, illustrando i moderni macchinari in uso nelle miniere della Sassonia, dalle macchine per l'educazione delle acque e per l'estrazione del minerale ai sistemi di ventilazione, dai processi e dalle tecniche dell'arricchimento dei minerali alle attrezzature e alle metodologie metallurgiche e di raffinazione dei metalli preziosi.

Pochi anni prima, Vannoccio Biringuccio, il fondatore dell'Arte mineraria e metallurgica italiana, pubblicò il *De la Pirotechnia* (1540), un trattato dove sono esaminati i metodi per la produzione di oro, argento, rame, mercurio, piombo, stagno e ferro, i metalli più diffusi al tempo (Fig. 2). Biringuccio fu per diversi anni sovrintendente delle miniere di Boccheggiano, in Toscana, e del Monte Avanza, in Carnia; la repubblica di Siena, anche grazie a lui, cercò di riattivare le miniere delle attuali Colline Metallifere, che nel Medioevo avevano fatto la fortuna di Montieri e di Massa, ma che erano rimaste quasi inattive dal 1348 in poi, quando la peste aveva falcidiato la popolazione della Maremma. L'ordinamento sistematico della trattazione distingue chiaramente l'opera di Biringuccio dai precedenti manoscritti di segreti e ricette relative a procedimenti tecnici specifici, cui molto probabilmente egli attinse, ma aggiungendo osservazioni e sperimentazioni personali. L'opera di Biringuccio fu però superata dal *De Re Metallica*, sia per la completezza del



Fig. 3. Annaberg (Sassonia), Sankt Annen Kirche, immagini del retro della Pala dell'altare dei minatori (*Annaberger Bergaltars*), dipinta da Hans Hesse nel 1521 (Foto: ©Paolo Macini).

testo e per l'uso del latino, più diffuso del volgare, sia per la ricchezza di particolari e la chiarezza delle illustrazioni, che lo hanno reso uno dei monumenti della tecnologia.

Nel XVI secolo la professione dell'ingegnere (minerario) si inizia a configurare come il trameste e la conseguenza di un progetto strutturale di natura eminentemente pubblica, sia per il controllo del territorio, sia per la produzione di beni e capitali strategici per le Amministrazioni. Agricola può quindi essere considerato il precursore della rivoluzione che investì le scienze minerarie e metallurgiche nel XVIII secolo. Infatti, verso la metà del 1700, nelle aree minerarie di lingua tedesca, nascono dapprima le *Bergschola* (1735), e in seguito le *Bergakademie* (1770), istituzioni dedite all'istruzione tecnica e alla trasmissione del sapere pratico relativo all'intero ciclo di produzione dei metalli, antesignane dei corsi di ingegneria mineraria moderni (Brianta, 2001).

Gli ingegneri minerari tedeschi arrivarono in Inghilterra già nei primi decenni del XVI secolo, ma l'isola avrà un destino diverso: ricca in carbone, ma povera di ferro, il Paese importò dalla Germania numerose tecniche metallurgiche, le sviluppò in proprio, e all'epoca della rivoluzione industriale divenne il maggior produttore di acciaio, grazie all'abbondanza del carbone delle sue miniere e al minerale di ferro importato da Spagna e Svezia (Fig. 3).

I modelli formativi delle *Bergakademie* ebbero successo anche oltreoceano, e in particolare nelle aree soggette alle potenze coloniali. Gli scambi tra la *Bergakademie* di Freiberg e i distretti minerari dell'America Latina furono intensi, non solo per lo sviluppo dell'insegnamento, ma anche per lo sfruttamento delle enormi risorse minerarie del nuovo continente. Molti scienziati europei operarono presso il *Real Seminario de Minería de la Nueva España*, a Città del Messico, compreso Alexander von Humboldt, il più illustre allievo della *Bergakademie* di Freiberg. Negli stessi decenni, non mancarono contatti anche con l'impero portoghese, e in special modo col Brasile, in virtù delle immense ricchezze minerarie che qui si stavano scoprendo (Brianta, 2000).

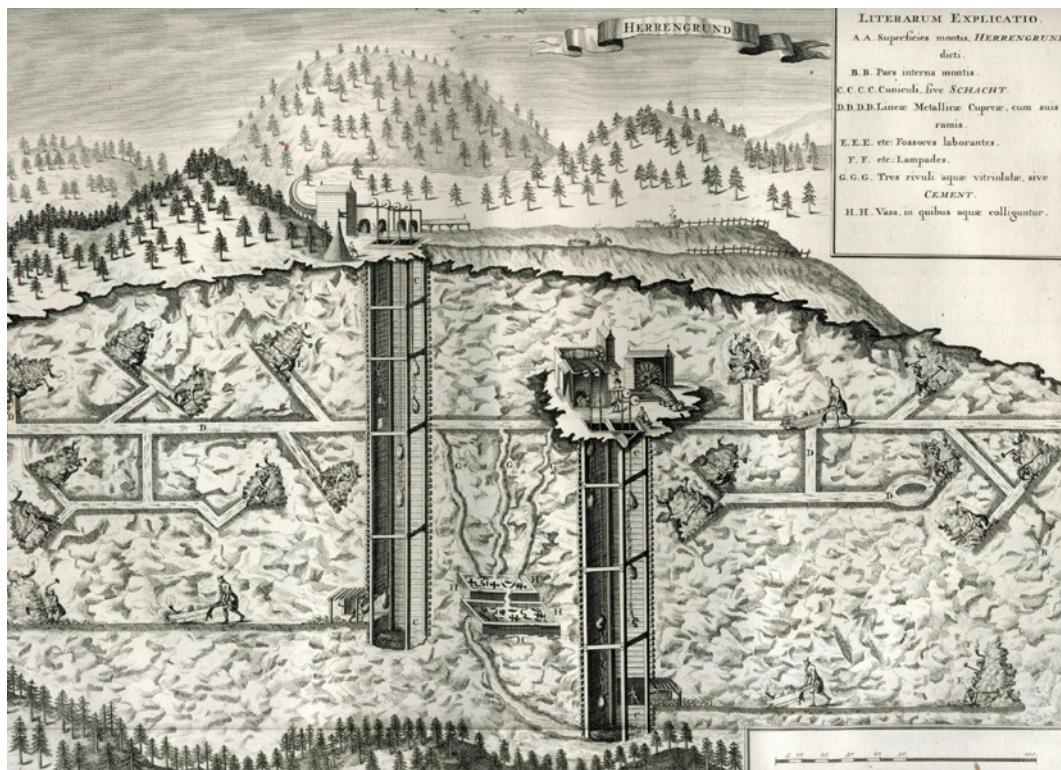


Fig. 4. Sezione verticale della miniera di rame di Herrensgrund (oggi Špania Dolina, Slovacchia) riccamente illustrata nell'opera di Luigi Ferdinando Marsili, *Danubius Pannonic-Mysicus* (1726). Si tratta di un esteso trattato di geografia, etnologia, geologia, e idrologia delle regioni danubiane, dove la raccolta dei dati, la ricognizione delle miniere e lo studio dell'arte mineraria è un preminente oggetto di applicazione e organizzazione militare (copia digitale da Belgrade University library "Svetozar Markovic", <http://ubsm.bg.ac.rs/engleski/dokument/1855/>).

Tutte le accademie minerarie europee furono visitate dall'élite del tempo, in special modo dai giovani Cadetti militari, in quanto discipline come l'artiglieria, il genio e l'ingegneria avevano ancora confini molto labili. In questo ambito è doveroso ricordare Luigi Ferdinando Marsili, scienziato, accademico, diplomatico, generale e fondatore dell'Istituto delle Scienze di Bologna, e in particolare al suo esteso trattato *Danubius Pannonic-Mysicus* (1726). Il trattato, oltre che descrivere questioni di geografia, etnologia, storia naturale, geologia e idrologia, affronta questioni di arte mineraria riporta dati di miniere e di operazioni minerarie arricchendo il testo con mirabili e dettagliate stampe (Fig. 4). Restando entro i confini della nostra penisola, già dalla metà del 1700 le scuole militari, e non solo quelle sabaude, fungevano da centri di sviluppo e diffusione delle discipline scientifico-tecnologiche, proprio mentre in Europa si strutturava la rete delle *Bergakademie* che, condividendo regole e metodologie sperimentali, diedero impulso alla nascita del pensiero scientifico moderno.

Secondo alcuni autori (Bulferetti, 1980; Brianta, 1997), il mondo germanico esercitò una forte attrazione su studiosi, militari e tecnici, che iniziarono a praticare periodi di formazione e viaggi di istruzione mineraria. Tra i più noti si ricordano Spirito Benedetto Nicolis di Robilant e Carlo Galeani Napione di Cocconato dal Regno sabaudo (Garuzzo, 2001), ma anche Giuseppe

Melograni dal Regno di Napoli (Melograni, 1809). Questo “tirocinio all'estero” può essere considerato come il contrappunto di carattere naturalistico e tecnologico al *Grand Tour* che gli intellettuali nordeuropei erano soliti svolgere in Italia proprio in quell'epoca, alla ricerca dell'antichità perduta. Ciò “rasentò in taluni casi il limite di un vero e proprio atteggiamento feticistico che ebbe l'effetto negativo di ritardare i contatti con il mondo anglosassone, nella fattispecie sia con la scuola geologica sia con la tecnologia mineraria britannica, in alcuni campi più rivoluzionaria [di quella dell'area germanica, *N.d.A.*]” (Brianta, 1997). Infine, si ricorda che in questo periodo le accademie minerarie furono i trampolini di lancio verso i ranghi più alti della pubblica amministrazione, e che i compatti produttivi trainanti della rivoluzione industriale furono il settore minerario e quello ferroviario, che necessitavano principalmente di ferro e carbone.

Nel corso dei primi decenni del 1800 in Europa inizia l'unificazione del pensiero tecnico scientifico, messo in atto anche dalle trasformazioni del pensiero politico e sociale che porteranno alla nascita degli Stati Moderni, atteggiamento che senza dubbio stimolò e favorì la circolazione di capitale umano e di cultura tecnica, al di là della nascita della tecnocrazia, ciò che porterà Otto Hue a scrivere nel suo *Die Bergarbeiter* che l'industria mineraria è “la culla della cultura dell'umanità” (Hue, 1910).

2. Lo sviluppo della cultura mineraria in Italia tra il 1700 e il 1800

Negli stati preunitari italiani, a cavallo tra il XVIII e i XIX secolo, la formazione degli ingegneri era affidata a modelli istituzionali diretti a impartire una formazione adeguata e rivolta al controllo e alla valorizzazione del territorio e delle sue risorse, all'ingegneria applicata alla direzione dei lavori pubblici, alla sistemazione idraulica del territorio e allo sviluppo delle tecniche agricole.

Nel Regno di Napoli non esistevano corpi tecnici professionali, e la direzione delle attività minerarie era affidata al Corpo di Artiglieria, che formava i tecnici per i vari rami dell'amministrazione, mentre in Sicilia era già attivo l'*Ispettorato delle solfare e dei calcheroni*; in Toscana era designato un *consultore tecnico* governativo per le miniere (1844), così come nel Ducato di Parma esisteva un ispettore minerario: si trattava però di cariche prettamente amministrative, per le quali non era richiesto il “titolo” di ingegnere. Uniche eccezioni erano rappresentate dal Regno di Sardegna, dove la settecentesca *Scuola Pratica di Mineralogia* avviata da Nicolis di Robilant presso l'Arsenale militare di Torino già vantava una solida tradizione mineraria, e dalla Serenissima, che nel 1775 ordinò al Soprintendente delle miniere di Agordo di istruire, attraverso un corso triennale a spese della Repubblica, quattro giovani per abilitarli alla professione di *Geometra montano* e *Direttore di fonderia* (Girolami, 1960).

Nel Regno di Sardegna il re Carlo Felice aveva istituito il Corpo Reale delle Miniere con le Regie Patenti del 18 ottobre 1822, che tolsero le competenze minerarie al Corpo di Artiglieria, avviando un regolare Servizio tecnico delle miniere alle dipendenze dell'Azienda dell'interno. In seguito, si decise di implementare i ranghi tecnici del Corpo Reale delle Miniere inviando alcuni ingegneri a specializzarsi all'estero a spese dello Stato. Questa pratica fu ufficializzata nel 1847 con la concessione di borse di studio a Quintino Sella e Felice Giordano per seguire i

corsi all'*Ecole des Mines* di Parigi, e fu ripetuta negli anni a seguire. Un'iniziativa analoga fu intrapresa anche nel Lombardo-Veneto, dove furono istituiti tre circondari diretti da *capitani montanistici* e ufficiali tecnici diplomati in una delle due accademie montanistiche imperiali, quella di Leoben o di Schemnitz (Brianta, 2007).

In seguito, con il Regio Decreto del 22 agosto 1848 il Corpo Reale delle Miniere passò dall'Azienda dell'Interno al Ministero di Agricoltura, Commercio e Marina e, poco dopo, il servizio minerario fu affidato al Ministero dell'Agricoltura, Industria e Commercio (R.D. 5 luglio 1860), che lo svolgeva attraverso il Corpo Reale delle Miniere, istituzione integralmente passata allo Stato italiano dal Regno di Sardegna. Abolito il Ministero dell'Agricoltura, il Corpo passò al servizio del Ministero dei Lavori Pubblici. Dopo l'Unità, il Regno d'Italia articolò il Corpo delle Miniere in distretti minerari (1863), con compiti di vigilanza, disciplina, studio, organizzazione e consulenza mineraria. La competenza in materia di miniere fu poi assegnata nel 1923 al Ministero dell'Economia Nazionale e quindi, nel 1929, al Ministero delle Corporazioni.

Con l'entrata in vigore della Costituzione repubblicana il servizio minerario fu infine assegnato al Ministero dell'industria e commercio, oggi transitato in parte alle Amministrazioni regionali e in parte al Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica. L'organizzazione territoriale dell'amministrazione mineraria rimase invece sempre basata sul Corpo delle Miniere e sulla suddivisione del territorio nazionale in Distretti minerari, ognuno dei quali era diretto da un Ingegnere capo. La prima ripartizione dei distretti fu attuata col Regio Decreto del 30 dicembre 1871 n. 619, ma in seguito le circoscrizioni distrettuali furono più volte modificate.

Se l'amministrazione mineraria ebbe già all'indomani della proclamazione del Regno d'Italia la propria organizzazione unitaria, l'unificazione del regime legislativo in materia di miniere avvenne con grande ritardo rispetto agli altri settori dell'attività dello Stato e sul territorio nazionale continuarono a sussistere regimi minerari diversi, ispirati a criteri notevolmente differenti, ereditati dagli Stati preunitari: l'attività di ricerca e di sfruttamento delle sostanze minerali fu disciplinata organicamente solo nel 1927, con il Regio Decreto n. 1443, *Norme di carattere legislativo per disciplinare la ricerca e la coltivazione delle miniere nel Regno*. Questa normativa, tuttora in vigore, attribuendo la proprietà del sottosuolo al demanio dello Stato, anche se non escludeva l'intervento diretto dello Stato, lasciava l'esercizio dell'attività mineraria ai privati, in virtù di autorizzazioni o concessioni.

3. L'istruzione degli ingegneri in Italia nel periodo post-unitario

Tra gli ultimi atti del Regno di Sardegna vi fu l'emanazione del Regio Decreto (R.D.) 13 novembre 1859 n. 3725 (Legge Casati), che aveva l'intento di riformare l'ordinamento dell'istruzione, dall'amministrazione ai gradi scolastici e alle materie di insegnamento, rafforzando la determinazione del nuovo Stato a intervenire in materia di educazione, anche con l'intento di porsi a fianco della Chiesa cattolica, che da secoli ne deteneva il monopolio. La legge introdusse, tra l'altro, l'obbligo scolastico nel Regno.

Nell'educazione universitaria, la legge Casati sostenne gli studi scientifici e speculativi, privilegiando aspetti non sempre legati a risvolti applicativi o in linea con la nascente industria nazionale. Nell'ambito dell'offerta formativa delle università italiane tra Otto e Novecento

erano presenti le cinque tradizionali facoltà di a) Teologia, b) Giurisprudenza, c) Medicina, d) Scienze Fisiche, Matematiche e Naturali, e) Filosofia e Lettere, mentre per quanto riguarda la formazione di livello professionale superiore, questa si realizzò all'interno di "Scuole speciali", dove si formavano non solo i futuri ingegneri, ma anche agronomi, farmacisti e veterinari. Sul piano della didattica esse erano regolate da una normativa molto simile a quella delle facoltà tradizioni, anche se mancava loro una pari dignità culturale (Calcagno, 1997; Minesso, 1996).

In particolare, nel primo ventennio post-unitario, l'Italia si dotò, o trasformò, due istituti culturali differenziati ma complementari: la Scuola di applicazione di Torino (1859), più vicina al modello francese di *haute école* per la pubblica amministrazione, di ispirazione fortemente scientifica alla quale si conformeranno sostanzialmente anche le Scuole di applicazione di successiva fondazione, e l'Istituto tecnico superiore di Milano (1863), più simile al modello tedesco di tipo politecnico e più aderente alle realtà produttive e interconnesso al mondo industriale. (Brianta, 2007). Il sistema educativo nazionale fu in seguito arricchito da una rete di scuole di applicazione a livello regionale, destinate a migliorare la diffusione territoriale degli istituti formativi (Napoli 1864, Palermo 1866, Roma 1873, Padova 1876, Bologna 1877).

Prima del 1875, per acquisire il "diploma di libero esercizio della professione di ingegnere civile ed architetto" era necessario conseguire la laurea presso la Facoltà di Scienze Fisiche, Matematiche e Naturali, poi sostenere alcuni esami specifici, quali meccanica applicata, agronomia teorico pratica, mineralogia e geologia, e quindi sostenere un esame generale finale di libera pratica; tutto ciò svolgendo, contemporaneamente, due anni di praticantato presso un "ingegnere architetto approvato" (Cocchi, 1988).

Tale *iter* di studi fu abolito dal R.D. 26 ottobre 1875 n. 2760: "Considerando come i corsi pratici per gli ingegneri civili e architetti che si fecero fino ad oggi presso le Università di Bologna e di Pisa siano riconosciuti incompleti e insufficienti a fornire le cognizioni necessarie per formare veri e propri ingegneri, di fronte allo stato attuale della scienza, ed a quanto si richiede per il conseguimento di tali titoli nelle scuole d'applicazione del Regno". Fortunatamente, questo decreto non si limitò solo ad abolire, ma istituì a Bologna il primo anno di una Scuola d'applicazione come parte integrante della Facoltà di Scienze Matematiche, Fisiche e Naturali. I futuri ingegneri, una volta frequentato con profitto questo primo anno, potevano iscriversi "senza altri esami" al penultimo anno del corso per gli ingegneri dell'Istituto tecnico superiore di Milano o delle altre Scuole d'applicazione del regno (Diotallevi, 2012).

Ma fu solo dopo il 1923 che la Scuola d'Applicazione cambiò la propria denominazione in Regia Scuola d'Ingegneria, e nel 1926 venne promulgato un nuovo statuto che introducesse corsi che fornirono l'istruzione necessaria a conseguire la laurea in ingegneria industriale. Grazie alla riforma Gentile (1923), il titolo di studio conferito dalle Scuole di Applicazione per la formazione degli ingegneri divenne una Laurea, aprendo la via alla trasformazione delle Scuole in Facoltà universitarie. Tale riforma formalizzò anche l'abilitazione all'esercizio della professione, imponendo il superamento di un Esame di stato. L'accesso alla formazione dei futuri ingegneri fu ristretto ai soli studenti di formazione liceale, fu riconosciuta la tutela legale e la dignità del titolo di ingegnere e, intorno alla metà degli anni 1930, vi fu la trasformazione dei Politecnici in Università e delle Scuole di applicazione per gli ingegneri in Facoltà universitarie.

4. L'istituzione dei corsi di Laurea in ingegneria mineraria in Italia

L'istituzione dei corsi di Laurea in ingegneria mineraria nella facoltà di Ingegneria italiane è stato un processo difficile e tortuoso. Dopo l'Unità d'Italia, e per i successivi cinquant'anni, gli studi ingegneristici privilegiavano una preparazione polivalente, con scarsa attenzione, se non addirittura aperta ostilità, verso le specializzazioni. Gli unici due indirizzi previsti per la Laurea in ingegneria erano quelli civile e industriale, ancorché ben poco differenziati, e presenti solo a Milano e a Torino (e qui solo dal 1879 in poi): in tutte le altre scuole di applicazione l'unico indirizzo era quello civile.

Il nuovo governo del Regno valutò fin da subito il possibile ruolo strategico dell'istruzione mineraria per lo sviluppo dell'industria di base. Purtroppo, la consapevolezza della povertà di ferro e di carbone del sottosuolo italiano, entrambi indispensabili all'industrializzazione, unita alle ristrettezze economiche del bilancio del giovane Stato, non giocarono in favore dell'istituzione di scuole nazionali, e si preferì continuare ad inviare i giovani laureati a studiare all'estero: “Una speciale scuola d'applicazione per gli ingegneri [delle miniere] non esiste in Italia e per altra parte non sarebbe opportuno consigliare per ora l'istituzione per difetto di apposito corpo insegnante che alla perfetta conoscenza della materia congiunga l'esercizio pratico, e di un grande istituto con copiosi materiali e collezioni, e per la spesa annua ingentissima, egli è perciò che trattandosi ora di compiere il numero degli ingegneri, ancor troppo scarso di fronte alle esigenze del nuovo Regno, [...] si ravvisò opportuno sottoporre alla attenzione di Sua Maestà un decreto che facesse facoltà al Ministero di inviare all'estero quattro allievi scelti fra gli ingegneri laureati” (Pepoli, 1862).

Questa posizione fu condivisa anche da Quintino Sella, astro nascente della politica nazionale e già ingegnere del Corpo delle Miniere, probabilmente per un gioco di equilibri politici; anche nella sua successiva veste di avarissimo Ministro delle Finanze nei vari governi che si succedettero tra il 1861 e il 1873, si oppose sempre all'istituzione di una scuola superiore delle miniere in Italia e, anzi, annullò anche le dotazioni finanziarie del Regio Ufficio Geologico, di cui aveva contribuito alla fondazione solo pochi anni prima.

Ciononostante, relativamente all'istruzione secondaria egli si fece promotore dell'istituzione a Iglesias della Scuola triennale per Capi minatore e Capi officina delle miniere (Sella, 1871) con annesso Museo Mineralogico e laboratorio docimastico (R.D. 10 sett. 1871, n. 472), sulla scorta delle già esistenti scuole professionali minerarie di Caltanissetta (1862, scuola per Capi minatori di solfure), Lovere-Bergamo (1864, scuola per l'industria siderurgica) e Agordo (1867, scuola teorico-pratica per Capi-minatori), cui seguirà Carrara (1871, originariamente scuola per i Marmi), scuola poi trasferita a Massa Marittima con specializzazione più tradizionalmente mineraria (1919). Ciò riflette l'atteggiamento della politica italiana del tempo: privilegiare la formazione scolastica secondaria, e dei relativi quadri intermedi, collegando lo studio al lavoro in miniera. Una risposta istituzionale che seguiva, non a caso, i momenti di picco produttivo dello zolfo in Sicilia, di minerali di piombo-zinco in Sardegna, del rame nell'agordino e nel volterrano, e, in seguito, delle piriti in Maremma. Tutte queste scuole minerarie ebbero generalmente come docenti nelle cattedre professionalizzanti gli stessi ingegneri addetti al servizio minerario in quelle località, e spesso l'ingegnere capo del Distretto ne era il Preside.

La prima e unica scuola post-laurea ad indirizzo minerario riconosciuta in Italia fu la Scuola superiore delle zolfare di Palermo, istituita presso la scuola d'applicazione di Palermo nel 1872 (R.D. 21 gennaio 1871, n. 741). Questa scuola non ebbe fortuna: il corso di studi, inizialmente biennale, divenne annuale nel 1876 e fu poi spento nel 1887, avendo diplomato solo 11 ingegneri (Brianta, 2007). In realtà, come già riconosciuto dallo stesso corpo delle miniere, non era una scuola “superiore” a tutti gli effetti, cioè “una scuola o accademia superiore per formare veri ingegneri di miniere atti a tutti i rami del servizio” (Ministero, 1881). Il Ministero di Agricoltura, Industria e Commercio, da cui dipendevano le miniere italiane attraverso il Regio Corpo delle Miniere, rimase dello stesso avviso per tutto l'ultimo scorci di secolo, ribadendo che una scuola di applicazione per le miniere sarebbe stata troppo costosa per lo Stato, e che quindi conveniva inviare gli allievi all'estero, dove peraltro avrebbero esaminato stabilimenti industriali, miniere e impianti metallurgici molto più perfezionati di quelli italiani, traendone un'istruzione assai più completa.

Nel frattempo, però, in assenza di una scuola superiore delle miniere completa, occorre menzionare che, presso il Regio Istituto tecnico superiore di Milano (il precursore dell'attuale Politecnico), negli ultimi anni del decennio 1860 fu istituita una cattedra di Metallurgia, ad uso degli ingegneri del ramo industriale. Va detto che nello stesso Istituto, nello stesso periodo, fu attivissimo insegnante anche il geologo Antonio Stoppani, che scrisse uno dei primi manuali di questa nuova scienza proprio per gli allievi di questa scuola (Stoppani, 1866). Nel 1875 fu aggiunta anche la cattedra di Arte mineraria, tenuta dal personale tecnico del Distretto minerario di Milano, e in particolare dall'ingegnere capo (Corpo delle Miniere) Vittore Zoppetti. Egli fu uno dei docenti più noti, e ci ha lasciato anche un eccellente manuale di Arte mineraria (Zoppetti, 1882). Nel 1925 il Regio Istituto tecnico superiore divenne la Regia Scuola di Ingegneria di Milano, e la cattedra di Arte mineraria fu assunta da Antonio Ferrari, anch'egli ingegnere capo del Corpo delle Miniere (in pensione), il quale aggiornò il materiale di studio di questa materia in un ulteriore manuale (Ferrari, 1926).

Le motivazioni che, tra la Prima e la Seconda Guerra Mondiale, portarono alla nascita di veri e propri Corsi di Laurea in ingegneria mineraria in alcune sedi universitarie, come Cagliari, Bologna, Roma, Torino, meritano ulteriori approfondimenti di archivio (ad es., la Scuola di ingegneria di Milano perse questo insegnamento). Certamente non fu estraneo il fatto che tra le due guerre, nella politica italiana si era fatta sempre più pressante la questione dell'indipendenza nazionale dalle fonti energetiche e dalle materie prime, entrambe oggetto di forte importazione. Le irrisolte esigenze di rifornimento energetico emersero già durante la Grande Guerra, imponendosi come fattore primario per i cambiamenti tecnologici e organizzativi del Paese. “Il primo, più importante scoglio sulla rotta dell'autarchia fu quello dei combustibili fossili, che erano di gran lunga la voce più elevata delle nostre importazioni” (Maiocchi, 2013).

Il 18 novembre 1935 la Società delle Nazioni deliberò le “sanzioni” contro l'Italia, accusata di aver violato il Patto, con l'aggressione dell'Etiopia. Fin dal 1935, e per tutta la prima metà del 1936, la scena politica italiana fu dominata prima dalla preparazione e poi dall'attuazione della guerra di Etiopia: l'economia, l'organizzazione istituzionale e la propaganda vennero subordinate al progetto di costruzione di un impero, e nacque ufficialmente l'autarchia. “La situazione drammatica in cui si vennero a trovare molte nostre attività produtti-

ve per le difficoltà di importazione svelò brutalmente la dipendenza dell'Italia dall'estero e impose all'attenzione di tutti la necessità di sfruttare al meglio le risorse presenti nel nostro Paese” (Maiocchi, 2013).

In questo senso, non fu trascurabile la propaganda e le mire imperiali del governo fascista: “La conquista dell’Impero ha dato un notevole impulso agli studi minerari e geologici. Il ministero dell’Educazione Nazionale, mentre ha provveduto a potenziarne l’organizzazione presso le nostre Università e Istituti superiori, [...] ha pur sentito l’opportunità d’indirizzare verso di essi una più vigorosa corrente di studenti mediante la corresponsione di borse, con la cooperazione del Ministero delle Corporazioni” (Annali, 1940).

Torino

Il Regio Decreto n. 4993 del 1879 istituisce presso la Regia Scuola di applicazione per gli ingegneri di Torino “una nuova categoria di ingegneri, detti Industriali. Il diploma d’ingegnere industriale abilita chi lo ha ottenuto a dirigere l’impianto e l’esercizio di opificii industriali, strade ferrate, coltivazioni minerarie, costruzioni metalliche, idrauliche e meccaniche, ed a sostenerne l’ufficio di perito giudiziale nelle questioni relative. Gli studi obbligatorii pel conseguimento del diploma di ingegnere industriale durano tre anni. Materie d’obbligo sono [...] l’arte mineraria e la metallurgia”. Trent’anni dopo, a partire dall’anno accademico 1908-1909, quando ormai la scuola si era trasformata nel Politecnico di Torino, fu attivato un corso di perfezionamento annuale in ingegneria mineraria, che aveva “lo scopo di dar modo agli ingegneri civili ed industriali meccanici di fare speciali studi teorici e pratici d’ingegneria mineraria (Regolamento Politecnico di Torino, 13 luglio 1908), e si avvaleva delle collezioni e delle attrezature esistenti nel gabinetto di ingegneria mineraria esistente presso il Castello del Valentino (Procacci, 1998). Questo corso fu trasformato in una sottosezione mineraria solo nel 1917-18 (Brianta, 2007). Qui insegnò l’ingegnere e geologo Augusto Stella, già in servizio presso il Regio Ufficio Geologico di Roma. Nel 1908 Stella ottenne la cattedra di Scienze minerarie a Torino e diresse la Scuola di perfezionamento di ingegneria mineraria sino al 1925, anno in cui fu chiamato ad insegnare scienza delle miniere presso la Scuola d’Ingegneria di Roma (vedi sotto), dove ha insegnato sino al 1935. Nel 1926 vi fu il riordino degli statuti Scuole di Ingegneria, e il R.D. n. 2131 del 14 ott. 1926 approvò lo Statuto della Regia Scuola d’ingegneria di Torino, che definisce ed istituisce la laurea in ingegneria mineraria.

Roma e Palermo

Per venire incontro alle ispirazioni autarchiche del regime, nel 1926, anche in occasione della stesura del testo di riunificazione della legge mineraria (si veda il citato R.D. n. 1443, 1927), presso le scuole di applicazione di Roma e Palermo furono attivati due veri e propri corsi di Laurea in ingegneria mineraria. In particolare, il R.D. n. 2279 del 4 novembre 1926 definisce lo statuto della Regia Scuola d’ingegneria di Roma, stabilendo che “fa parte della R. Scuola d’ingegneria di Roma la Scuola di ingegneria mineraria che ha per fine di promuovere il progresso della scienza e dell’arte mineraria e di fornire la preparazione scientifica per la carriera del Corpo Reale delle miniere e per la professione di ingegnere minerario. Essa rilascia la laurea in ingegneria mineraria”.

Relativamente all'Ateneo palermitano, fu emanato un decreto simile al precedente (R.D. n. 2129 del 14 ott. 1926), che approva lo Statuto della Regia Scuola d'ingegneria di Palermo, istituendo per analogia la laurea in ingegneria mineraria. Il corso di Palermo non ebbe fortuna, e per difficoltà operative e burocratiche non entrò mai in funzione (Benfratello, 2006). Nel dopoguerra tornò da Roma il giovane Prof. Giuseppe Aprile, che istituì e operò all'interno dell'Istituto di Arte mineraria (Aprile, 1958). In seguito all'adeguamento dello Statuto della Facoltà di ingegneria di Palermo (D.P.R. n. 546 del 7 feb. 1961) la Laurea in ingegneria mineraria fu soppressa, che pure aveva una tradizione culturale nell'isola (Benfratello, 2006), e nonostante che la relativamente giovane amministrazione a statuto speciale della Regione Siciliana (R.D. 15 maggio 1946, n. 455) avesse assunto tra i propri ambiti di legislazione esclusiva anche tutti i beni del sottosuolo, ormai facenti parte del patrimonio indisponibile della Regione.

Cagliari

La Facoltà di Ingegneria dell'Università di Cagliari è stata costituita nell'anno 1939, con l'istituzione del solo corso di Laurea in ingegneria mineraria. Le prime lezioni si tennero presso la Facoltà di Scienze Matematiche, Fisiche e Naturali, ma già nel 1940 la Facoltà di Ingegneria ebbe una sede propria. Solo nel 1950 fu aggiunto un secondo corso di laurea: Ingegneria Civile con indirizzo Edile. Proprio a Cagliari, un illustre studioso della Scuola di ingegneria bolognese, il Prof. Paolo Dore, in una sua memoria per il Congresso minerario italiano del 1948 ricorda che:

“A Bologna, ad esempio, la sezione mineraria sorse con il fine specifico di preparare degli ingegneri atti alla ricerca e alla coltivazione di giacimenti di idrocarburi, ma si è ben guardata dal limitare a questo specifico fine la preparazione degli ingegneri minerari che, se tali devono essere, devono avere gli elementi che li pongano in grado di sviluppare ogni attività professionale inerente all'ambito minerario” (Dore, 1950).

La direzione della Facoltà di Ingegneria dell'Università di Cagliari, nonché del neonato Istituto di arte mineraria dell'Ateneo bolognese, istituito presso la nuova sede della Facoltà di Ingegneria, fu assegnata per incarico a Luigi Gerbella, già Direttore Generale delle miniere e della metallurgia nel governo Mussolini e uomo chiave dell'industria mineraria italiana nella prima metà del 1900. Tutti i tecnici, i periti e gli ingegneri minerari italiani conoscono Gerbella per il suo manuale tecnico “Arte mineraria”, pubblicato in tre volumi tra il 1937 e il 1938, e poi ristampato e aggiornato fino al 1960 (Gerbella, 1937).

Bologna

Nella nuova sede della Facoltà di Ingegneria dell'Università di Bologna (Fig. 5) nel 1941 fu istituita la “Sezione mineraria”, essendo stato fondato, nello stesso anno, l'Istituto di arte mineraria, che si affiancava ai già esistenti Istituti di Scienze delle costruzioni, Idraulica, Costruzioni idrauliche, Costruzioni stradali e ferroviarie, Macchine, Elettrotecnica, Meccanica applicata alle macchine, Tecnologie generali, Tecnologie speciali, Chimica applicata, Architettura tecnica, Fisica tecnica, Topografia, Geodesia e geofisica mineraria (Archivio Storico della Camera dei deputati, “Istituzione di una Sezione di ingegneria mineraria presso la Facoltà di ingegneria della regia Università di Bologna”. Atto C 1238, approvato dalla Commissione nella riunione del 23 gennaio 1941 (03.12.1940 - 23.01.1941), volume 1397, 884-903 cc. (20 cc.). Ministro

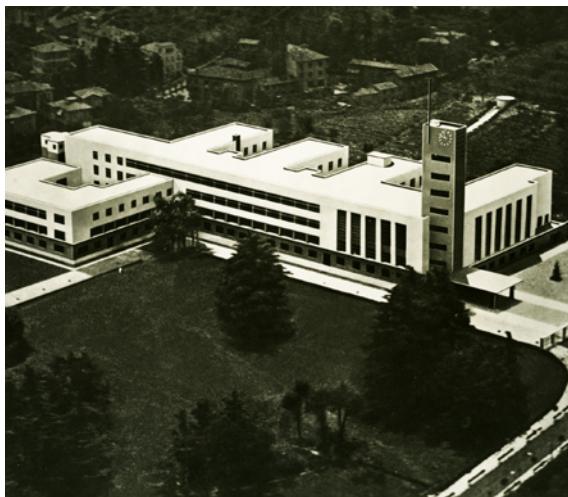


Fig. 5. La nuova Facoltà di Ingegneria dell'Università di Bologna, sita in Viale del Risorgimento, fu costruita su progetto dell'architetto Giovanni Vaccaro, e inaugurata il 28 ottobre 1935 (Alma Mater Studiorum Università di Bologna - ASUBO - Archivio fotografico, F. Ingegneria, Lastre negative 1930-1950, 54).

dell'educazione nazionale, Bottai, Ministro delle finanze, Thaon di Revel).

L'istituzione di una scuola di ingegneria mineraria si affiancò quindi al già importante nucleo amministrativo del Distretto minerario di Bologna, che gestiva sia la produzione dei giacimenti solfiferi della Romagna e delle Marche, oltre a produzioni minori di minerali industriali, e nel cui territorio di competenza si stava affacciando una promettente attività nel campo degli idrocarburi, petrolio e gas naturale, la cui consistenza al tempo non era nota con precisione, e che si sarebbe rivelata strategica per il Paese solo nel primo dopoguerra. Numerosi furono i funzionari e i dirigenti del Distretto minerario che collaborarono alla didattica all'interno del nuovo corso di laurea.

Una svolta nell'indirizzo dei corsi di laurea in ingegneria mineraria si ebbe nell'anno 1958-59, quando la Facoltà di Ingegneria di Bologna decise di creare, primo in Italia, il settore idrocarburi attivando la disciplina "Meccanica dei giacimenti di idrocarburi" (Cocchi, 1988), tenuto dal Prof. Bruno Poggi (1919-2005), pioniere di tali studi in Italia. Non a caso, l'anno precedente era stata promulgata la legge 11 gennaio 1957, n. 6, che disciplina la ricerca e la coltivazione degli idrocarburi liquidi e gassosi, e istituisce l'Ufficio nazionale minerario per gli idrocarburi, con una sede a Bologna e competenza territoriale estesa a tutta l'Italia settentrionale. Altre due sedi furono istituite a Roma e Napoli, con competenze territoriali estese all'Italia centrale e meridionale, rispettivamente.

Epilogo

La presa di coscienza dell'importanza delle problematiche ambientali ai fini della tutela della qualità della vita favorì, alla fine degli anni 1980, l'istituzione nelle Università italiane dei Corsi di Laurea in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio (D.P.R. 20 maggio 1989, concernente "Modificazioni all'Ordinamento Didattico delle Facoltà di Ingegneria", G.U. 10 agosto 1989), con l'obiettivo precipuo di formare giovani professionisti con competenze multidisciplinari, in grado sia di analizzare le questioni riguardanti le complesse dinamiche che coinvolgono le componenti ambientali e le trasformazioni territoriali, sia di pianificare, progettare, gestire e manutenere le opere e gli interventi necessari a garantire lo sviluppo in armonia con la tutela dell'ambiente. In particolare, la base comune della preparazione del laureato specialista è la progettazione di opere e impianti compatibili con il territorio e l'ambiente, formando tecnici

in grado di operare nella pianificazione, progettazione, realizzazione e gestione di sistemi ambientali anche complessi.

Con l'approvazione di questo nuovo ordinamento didattico, in Italia scompare formalmente il corso di Laurea in ingegneria mineraria, che viene ricompreso all'interno dei nuovi corsi di Laurea in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio, sotto forma di "indirizzo" nelle varie sedi che ancora conservavano il tradizionale corso di laurea in ingegneria mineraria (Bologna, Cagliari, Roma, Torino e Trieste). Venne così a svilupparsi un settore dell'ingegneria che riguardava lo sviluppo di tecnologie destinate a minimizzare l'impatto delle attività antropiche (agricoltura, industria, insediamenti urbani, trasporti, ecc.) sugli ecosistemi naturali e sulla salute pubblica, ma anche rivolte alla protezione delle risorse naturali: gestione integrata del ciclo dell'acqua, dalle opere di captazione al trattamento e smaltimento dei reflui e dei fanghi; gestione dei rifiuti, recupero di materie prime e di energia; protezione della qualità dell'aria, riduzione dell'inquinamento da emissioni industriali e da trasporti; sviluppo di tecnologie per rendere ecocompatibili le produzioni industriali di materie prime, agricole e zootecniche; risanamento di ambienti naturali compromessi, quali falde contaminate, suoli inquinati, laghi eutrofizzati, ecc.; monitoraggio; valutazione dell'impatto ambientale e promozione dello sviluppo sostenibile, nonché piani di Protezione Civile.

Tale organizzazione è rimasta integralmente in vigore fino all'anno accademico 2001-2002, quando, per effetto delle modifiche all'Ordinamento degli Studi Universitari introdotte dal Decreto del Ministro dell'Università e della Ricerca Scientifica e Tecnologica n. 509 del 3 novembre 1999, fu avviato, progressivamente nel tempo, il passaggio all'articolazione su due livelli del percorso degli studi di Ingegneria, con esito finale il conseguimento dapprima della Laurea, di durata triennale, e, quindi, in successione della Laurea Specialistica, di durata biennale. L'organizzazione degli studi è stata poi nuovamente modificata da un ulteriore Decreto del Ministro dell'Università e della Ricerca Scientifica e Tecnologica (Decreto n. 270 del 22 ottobre 2004), che ha mantenuto l'articolazione degli studi di Ingegneria in due livelli, denominandoli "Laurea" (o Laurea di primo livello, di durata triennale) e, posta in successione, "Laurea Magistrale", di durata biennale.

Bibliografia

1. Aprile, Giuseppe. 1958. *Arte mineraria: compendio del corso di lezioni*. Edizioni Delf, G. Denaro: Palermo.
2. Annali [gli] della Università d'Italia. Legislazione e amministrazione. 1940. *Borse per studi minerari e geologici*, 1(3), 31. Bonanni: Roma.
3. Benfratello, Guglielmo. 2006. Profilo storico della Facoltà di Ingegneria di Palermo. In *Contributi per una Storia della Facoltà di Ingegneria di Palermo*, a cura di La Mantia, F.P. Fotograf: Palermo, pp. 9-121.
4. Brianta, Donata. 1977. Industria mineraria e professione dell'ingegnere in Piemonte e Savoia tra Sette e Ottocento: l'apporto del modello franco-tedesco. In *Avvocati, medici e Ingegneri*, a cura di Betri, M.L., Pastore, A. CLUEB: Bologna, pp. 255-278.

5. Brianta, Donata. 2000, 2001. Trasmissione del sapere tecnico nell'industria dei "non ferrosi" e circolazione dell'ingegnere minerario in Europa e in America Latina, 1750-1850. *Ricerche di storia sociale e religiosa*, parte I, 2000, 29(58), 127-159; parte II, 2001, 30(59), 195-246.
6. Brianta, Donata. 2000. Stato moderno, corpi tecnici e accademie minerarie: influenze e scambi nell'età dei Lumi e in età napoleonica. In *Amministrazione, formazione e professione: gli ingegneri in Italia tra Sette e Ottocento*, a cura di Blanco, L. Il Mulino: Bologna.
7. Brianta, Donata. 2007. *Europa mineraria. Circolazione delle élites e trasferimento tecnologico (secoli XVIII-XIX)*. Franco Angeli: Milano.
8. Bulferetti, Luigi. 1980. La siderurgia piemontese e valdostana nel sec. XVIII. *Ricerche storiche*, 10(3), 519-556.
9. Calcagno, Gian Carlo. 1997. La Scuola per gli ingegneri dell'Università di Bologna tra Otto e Novecento. *Annali di storia delle università italiane*, 1, 149-163.
10. Cocchi, Giovanni. 1988. Cento anni di Scuola di Ingegneria a Bologna. In *L'Università a Bologna. Maestri, studenti e luoghi dal XVI al XX secolo*, a cura di Brizzi, G.P., Marini, L., Pombeni, P. Silvana editoriale: Bologna, pp. 195-205.
11. Diotallevi, P.P. 2012. Una Facoltà tra due Scuole: la Facoltà di Ingegneria dell'Università di Bologna (1935-2012). In *Scienza e tecnica nel Settecento e nell'Ottocento: la rivoluzione industriale vista dagli ingegneri*, a cura di Mesini, E., Mirri, D. CLUEB: Bologna, pp. 573-596.
12. Dore, Paolo. 1950. Osservazioni sulla preparazione degli ingegneri minerari. *Atti del congresso minerario italiano, Cagliari 1948*. Associazione Mineraria Sarda: Iglesias, pp. 3-4.
13. Ferrari, Antonio. 1926. *Arte mineraria: Lezioni date nella Regia Scuola d'ingegneria di Milano*. Hoepli: Milano.
14. Garuzzo, Valeria. 2001. *Viaggi mineralogici di Spirito Benedetto Nicolis di Robilant*; Olshki: Firenze.
15. Gerbella, Luigi. 1937. *Arte mineraria*, 3 voll.; Hoepli: Milano.
16. Girolami, Giovanni. 1960. L'istruzione tecnica per la formazione dei periti industriali minerari. In *1860-1960, Centenario del corpo delle miniere*; Collegio sindacato nazionale ingegneri del Ministero per l'industria e il commercio. ANIAI: Roma, pp. 75-80.
17. Hue, Otto. 1910. *Die Bergarbeiter. Historische Darstellung der Bergarbeiter-Verhältnisse von der ältesten bis in die neueste Zeit*. Dietz: Stuttgart.
18. Macini, P., Mesini, E. (a cura di). *Georgius Agricola De re metallica, con in appendice il De animantibus subterraneis – Bermannus, ovvero un dialogo sul mondo minerale*. CLUEB: Bologna, 2003.
19. Macini, Paolo, Mesini, Ezio. 2004. Hydraulic Pumps of Agricola's *De Re Metallica* (1556). *J. of Hydraulic Eng.*, 130(11), 1051-1054.
20. Maiocchi, Roberto. 2013. L'Italia e l'autarchia. In *Il Contributo italiano alla storia del Pensiero. Tecnica*, a cura di Clericuzio, A., Ricci, S. Treccani: Roma, pp. 548-555.
21. Marsili, Luigi Ferdinando. 1726. *Danubius Pannonico-Mysicus*. Hagae Comitum, Apud P. Gosse, R. Chr. Alberts, P. de Hondt: Amstelodami.

22. Melograni, Giuseppe. 1809. *Compendio geologico di Giuseppe Melograni, membro del Reale Instituto d'Incoraggiamento*. Stamperia del Corriere: Napoli.
23. Minesso, Michela. 1996. L'ingegnere dall'età napoleonica al fascismo. In *Storia d'Italia Annali, I Professionisti*, a cura di Malatesta, M. Einaudi: Torino, pp. 257-302.
24. Ministero d'Agricoltura, Industria e Commercio. 1881. *Notizie statistiche sull'industria mineraria in Italia dal 1860 al 1880*. Regio Corpo delle Miniere: Roma.
25. Pepoli, Gioacchino. 1862. *Relazione del Ministro di agricoltura, industria e commercio (Pepoli) sopra gli istituti tecnici, le scuole di arti e mestieri, le scuole di nautica, le scuole delle miniere e le scuole agrarie presentata alla camera dei Deputati nella tornata del 4 luglio 1862*. Eredi Botta: Torino.
26. Procacci, Paola (a cura di). 1998. *La "Scuola d'applicazione per gl'ingegneri" e il "Reale Museo Industriale Italiano"*. Raccolta di Leggi e Reali Decreti dal 1859 al 1906; Memorie Politecniche 1. Politecnico di Torino - Centro Museo e Documentazione Storica: Torino.
27. Sella, Quintino. 1871. *Sulle condizioni dell'industria mineraria nell'isola di Sardegna, relazione alla commissione parlamentare d'inchiesta, presentata alla Camera il 3 maggio 1871*. Eredi Botta: Firenze.
28. Stoppani, Antonio. 1866. *Note ad un corso annuale di Geologia dettate per uso degli ingegneri allievi del Reale istituto tecnico di Milano*. Bernardoni: Milano.
29. Zoppetti, Vittore. 1882. *Arte mineraria: Nozioni sulla coltivazione delle miniere desunte dal corso annuale d'arte mineraria tenuto nel Regio Istituto tecnico superiore di Milano*. Hoepli: Milano.

Gian Domenico Cassini: la misura del “mondo”

Bruno Marano

Professore Emerito, Alma Mater Studiorum - Università di Bologna, Accademico Benedettino

Abstract

Opening speech of the Celebration of the 400th anniversary of the birth of Gian Domenico Cassini, world famed Astronomer of the 17th century, professor at the Bologna University, founder and first director of the Paris Observatoire. Academy of Sciences, Feb. 27, 2025.

Keywords

Gian Domenico Cassini life and discoveries; Sundial in San Petronio Cathedral; Distances in the Solar System; Birth of Geodesy.

1. Da Perinaldo a Bologna

Questa mia presentazione è l'introduzione alla celebrazione del 400^o anniversario della nascita di Gian Domenico Cassini (1625) (Fig. 1)¹. Non darò conoscenze nuove – il convegno di giugno vedrà studiosi dedicati a questo –, limitandomi a descrivere le scoperte e le attività che ne fanno una delle figure di maggior rilievo nella scienza del XVII secolo. In questo emergerà il legame di Cassini con Bologna, che motiva essere questa città, la sua Università e l'Accademia delle Scienze la sede primaria di queste celebrazioni.

Nato a Perinaldo, feudo dei Doria nell'Appennino ligure, studiò a Genova presso i Gesuiti. Raggiunta una certa fama giovanile, fu chiamato nel 1646 dal Marchese Cornelio Malvasia presso il suo Castello di Panzano, nel contado (allora) Bolognese. Come diversi maggiorenti dell'epoca, il Marchese aveva edificato una specola privata, ma la sua visione andava oltre. L'insegnamento scientifico nella Università di Bologna era in una fase di stallo, e la cattedra di matematica era vacante per la morte di Bonaventura Cavalieri.

Una vivacità molto maggiore mostrava la Scuola dei Gesuiti, con due figure di indubbio rilievo, Riccioli e Grimaldi, eccellenti osservatori e sperimentatori, anche se verosimilmente condizionati dalla gerarchia ecclesiastica (siamo a pochi anni dal processo a Galileo, e siamo nello Stato della Chiesa).

Un anno dopo la sua chiamata a Panzano, il Malvasia propose Cassini per la copertura della cattedra di Matematica, che fu approvata dal Senato della Città. È lecito pensare che il lungimirante conte volesse verificare le capacità del giovane ligure prima di proporlo e sostenerlo come successore di Cavalieri.

2. Le Effemeridi Bolognesi dei satelliti medicei

La misura delle longitudini, problema secolare per la navigazione e la geodesia, richiedeva (e richiede) un “orologio universale”. Galileo capì che le eclissi dei satelliti medicei, da lui scoperti, potevano avere questa funzione: la qualità dei telescopi era però ancora primitiva e la conoscenza dei tempi di eclissi troppo povera perché il metodo potesse funzionare. Cassini affrontò la questione con strumentazione più evoluta e grande capacità di osservatore e produsse le “Ephemerides Bononienses Mediceorum Syderum” (Fig. 2), che lo resero famoso in Europa per la loro precisione. Il metodo però non funzionava in navigazione, richiedendo osservazioni impossibili dalla tolda di una nave. Funzionava però sulla terra,



Fig. 1. Domenico Cassini nel periodo parigino. Anonimo, olio su tela, Museo di Palazzo Poggi, Bologna (Quadreria dell'Università di Bologna, inv. n. QUA 305).

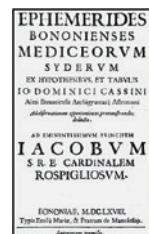


Fig. 2. Frontespizio delle “Ephemerides Bononienses Mediceorum Syderum”, Biblioteca Storica di Astronomia del Dipartimento di Fisica e Astronomia.

¹ Tutte le immagini sono pubblicate a colori nell'edizione online degli *Annales*.

e fu alla base dello sviluppo delle tecniche di triangolazione che segnarono l’attività di quattro generazioni di Cassini, portò alle prime carte moderne della Francia e, di fatto, rappresentò la nascita della geodesia moderna.

3. La Meridiana di San Petronio

Una delle iniziative più notevoli e ben note di Cassini, che ha lasciato la traccia permanente a Bologna, fu la realizzazione della Meridiana nella Basilica di S. Petronio, allora – e tuttora – la più grande del mondo (Fig. 3). Nel 1655 la Fabbrica di San Petronio chiese a Cassini di realizzarla, in sostituzione di una precedente demolita nell’ampliamento della chiesa. Lo scopo dichiarato era quello di stabilire con precisione la durata dell’anno tropico, richiesta dalla riforma del Calendario di Gregorio XIII e dalla connessa revisione della liturgia. Le dimensioni dell’edificio erano tra le massime al mondo (si ricordi che nella volontà dei bolognesi la Basilica doveva essere più grande di San Pietro e leggenda vuole che il Papa ordinasse la costruzione

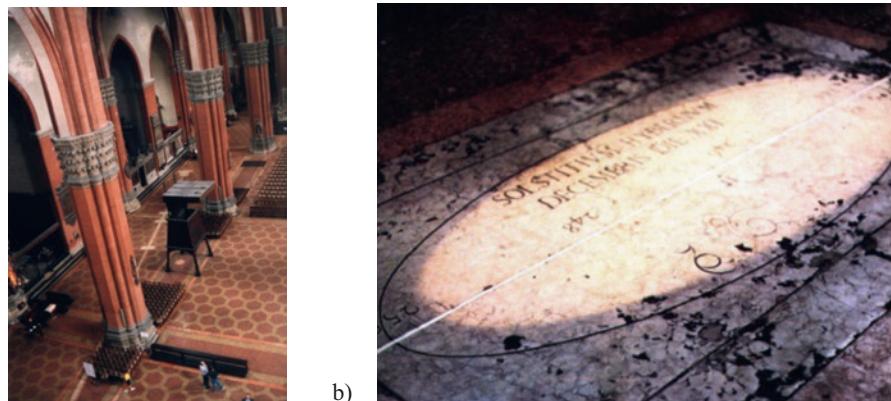


Fig. 3 a) La Meridiana di San Petronio e b) l’immagine del Sole al Solstizio di inverno. Foto cortesia di Fabrizio Bonoli.

dell’Archiginnasio per impedire la realizzazione del transetto, occupando lo spazio destinato ad esso). Cassini realizzò un vero strumento scientifico, di precisione assai maggiore di quanto servisse allo scopo originario, per poter effettuare una serie di esperimenti e misure sulle proprietà “dell’orbita del Sole”. Fu proprio usando la sua meridiana che Cassini arrivò per primo a dimostrare empiricamente la corrispondenza delle variazioni del diametro solare nell’anno alle previsioni del modello Copernicano e la discordanza con quelle del modello Tolemaico. Tutto ciò con la spada di Damocle dell’Inquisizione, che censurava e condizionava le attività non solo di Cassini, ma anche – e soprattutto – dei gesuiti Rizzoli e Grimaldi. Una potenziale grave perdita per lo sviluppo dell’ambiente scientifico bolognese, e non solo di esso, ovviamente.

Per le sue riconosciute capacità tecniche e la sua autorità, a Cassini fu richiesto di operare come “magistrato alle acque”, dirimendo un contrasto tra Bologna e Ferrara sul corso del Reno, responsabile, insieme ai molti torrenti tra Bologna e la Romagna, di continue alluvioni nella “bassa”: un problema purtroppo tuttora attuale.

4. La “chiamata” a Parigi

La fama di Cassini si era estesa all’ambiente europeo. Il re Luigi XIV aveva iniziato una vera e propria opera di reclutamento dei maggiori scienziati europei, tra cui l’olandese Huygens. Un primo tentativo di “arruolare” anche Cassini andò a vuoto per la resistenza del Senato Bolognese, da cui dipendevano i professori universitari.

Luigi XIV intervenne allora direttamente su Papa Clemente IX, cui i buoni rapporti col Re cattolico premevano molto, e Cassini fu libero di trasferirsi nel 1669 in Francia, *mantenendo per anni gli incarichi e gli stipendi che aveva ottenuto in Italia*. A Parigi il Re lo incaricò di sovraintendere al completamento dell’Osservatorio di Parigi, probabilmente il primo esempio moderno di istituto scientifico creato e finanziato dello Stato (la Biblioteca di Alessandria restando l’esempio più significativo dell’antichità, almeno in Occidente).

Delle molte rilevanti scoperte e vere e proprie imprese realizzate a Parigi, divenuto direttore dell’Observatoire, mi limiterò a ricordarne due.

5. La velocità della luce

Lo studio delle effemeridi dei satelliti di Giove, iniziato a Bologna, proseguì con la collaborazione dell’olandese Roemer, anch’egli “scritturato” dal Re Sole. Trovarono una discrepanza tra gli intervalli delle eclissi del satellite più vicino a Giove, Io: quando il pianeta si avvicinava, gli intervalli si accorciavano, per poi allungarsi della stessa quantità quando il pianeta si allontanava. Nell’agosto del 1675 Cassini scrisse: “Cette seconde inégalité paraît venir de ce que la lumière emploie quelques temps à venir du satellite jusqu’à nous, et qu’elle met environ dix à onze minutes à parcourir un espace égal au demi-diamètre de l’orbite terrestre” (Questa seconda disuguaglianza sembra dovuta al fatto che la luce impiega un certo tempo per raggiungerci dal satellite; la luce sembra impiegare da dieci a undici minuti per attraversare una distanza pari al semidiametro dell’orbita terrestre). Era la scoperta della velocità finita della luce. Cassini si mostrò poi dubioso su questa affermazione e non la riprese più. L’allievo Roemer proseguì le misure, pubblicando poi quella che è universalmente riconosciuta come la prima misura della velocità della luce. Difficile per me capire come una mente acuta come Cassini potesse recedere dalla sua idea originale. Lascio agli storici analizzare in modo approfondito i documenti e i motivi di questo passo indietro, ma non posso non sospettare una ritrosia di Cassini, astronomo dello Stato della Chiesa, a rendere ufficiale ed esplicita la sua adesione al sistema Copernicano, presupposto della citata interpretazione delle anomalie delle eclissi di Io.

6. Le distanze di Marte e del Sole

La distanza del Sole dalla Terra era stata fin dall’antichità oggetto di tentativi determinarla con metodi geometrici. Già Ipparco (II sec. a.C.) aveva ottenuto una misura della parallasse della Luna, cioè della diversa posizione apparente da punti di osservazione separati, da cui risultò una distanza del satellite molto precisa.

La parallasse solare, per il suo piccolo valore e la mancanza di punti di riferimento adeguati sulla sua superficie, fu oltre le possibilità di misura per secoli e la distanza, stimata con altri metodi, fu enormemente sottostimata. Sulla base del sistema Copernicano era possibile ottenere le proporzioni, ma non i valori assoluti, delle distanze dei pianeti dal Sole. Una situazione molto favorevole ad una misura precisa era data dalle opposizioni di Marte, quando esso, massimamente vicino alla Terra, è ad una distanza che è 0,37 volte la distanza Terra-Sole.

Nel 1672, in occasione di una opposizione di Marte, Cassini organizzò una spedizione in Cayenna per effettuare misure contemporanee della posizione di Marte osservata da due punti quanto più distanti possibili. Le tavole delle effemeridi di Io consentivano di stabilire la contemporaneità delle osservazioni. Quando, un anno dopo, furono disponibili le misure effettuate in Cayenna dall'astronomo Richer, “deportato” laggiù per un paio di anni, ne risultò una parallasse di Marte di 25''. Ne risultava una parallasse solare di 8'',5' e una distanza del Sole di 21.600 Raggi Terrestri. Contemporanee misure di parallasse *diurna* (basata sulla rotazione della terra) a Parigi e Londra confermavano quel risultato. L'*Universo* era 20 volte più grande di quanto si era ritenuto in passato. Cassini, costruttore della Meridiana di San Petronio a Bologna, era il primo a disporre di una misura realistica delle dimensioni del sistema solare (*la misura del mondo*).

Conclusione

La grande novità introdotta da Cassini negli studi scientifici fu la capacità di organizzare campagne coordinate, rese possibili dalla struttura dell'Observatoire. Esse portarono, oltreché alla citata misura della distanza Sole-Terra alla determinazione moderna della lunghezza del Meridiano terrestre e all'organizzazione metodica delle misure geodetiche della Francia che, ereditata e proseguita da figlio e nipoti, portò alla prima carta geografica moderna della Francia.

L'Università di Bologna non si rassegnò mai alla assenza di Cassini e lo “mantenne in catena” fino alla sua morte, manifestando a volte un certo “nervosismo” per la sua prolungata “leve of absence”, diremmo oggi. Di fatto nel 1695 Cassini fece un breve ritorno a Bologna dove, con l'aiuto del figlio Giacomo e di Domenico Guglielmini, restaurò la sua meridiana. Restò poi in contatto con Eustachio Manfredi e l'Accademia degli Inquieti, primo embrione dell'Istituto delle Scienze di Bologna, promosso da Luigi Ferdinando Marsili.

Identificare le fasi prodromiche della demenza attraverso l'analisi computazionale del linguaggio: quindici anni di ricerche sull'italiano*

Gloria Gagliardi, Fabio Tamburini

Dipartimento di Filologia Classica e Italianistica, Alma Mater Studiorum – Università di Bologna

Contributo presentato da Rema Rossini Favretti[†]

Abstract

Early identification of cognitive impairment, especially in the subclinical phases of neurodegenerative diseases, is a key challenge for modern healthcare. Traditional screening tools often fail to detect the subtle language and cognitive changes that precede dementia. Given the strong evidence that language is one of the earliest faculties affected by neurodegeneration, linguistic analysis is emerging as a promising tool for early diagnosis. This paper presents a novel approach developed by the University of Bologna's Department of Classical Philology and Italian Studies, which uses Natural Language Processing (NLP) and Artificial Intelligence (AI) to automatically analyze patients' speech. By extracting linguistic *biomarkers* from semi-spontaneous vocal recordings, the method aims to support early detection of cognitive decline and offers a preliminary communicative profile of Italian-speaking individuals with dementia.

Keywords

Natural Language Processing, Dementia Diagnosis, Digital Linguistic Biomarkers

1. Introduzione

L'individuazione del deterioramento cognitivo – in particolare se indotto da malattie da *misfolding* proteico – nelle sue fasi sub- e pre-cliniche rappresenta una sfida cruciale per i sistemi sanitari. Una diagnosi tempestiva dei Disturbi Neurocognitivi [1] consente infatti di proporre precocemente trattamenti terapeutici, riabilitativi e assistenziali, di pianificare in maniera personalizzata gli interventi, e conseguentemente di migliorare la qualità di vita dei pazienti riducendo al contempo il carico psicologico che grava sui *caregiver* e l'impatto economico sulla spesa pubblica [2].

Nonostante l'ampia disponibilità di test per la valutazione dello stato cognitivo, le metodologie di *screening* attualmente in uso (test “carta e matita”) si rivelano poco sensibili nel rilevare le sottili compromissioni cognitive che caratterizzano le fasi prodromiche della demenza, e soprattutto di predirne la progressione [3]. Sempre più evidente è dunque la necessità di esplorare nuovi domini di analisi in grado di affiancare i tradizionali strumenti neuropsicologici [4].

Numerose evidenze scientifiche dimostrano che il linguaggio, in quanto facoltà cognitiva complessa, risulta pervasivamente e prodromicamente interessato dai processi neurodegenerativi [5]: grazie ai progressi raggiunti nel settore del Trattamento Automatico del Linguaggio naturale (NLP - *Natural Language Processing*) e dell'Intelligenza Artificiale (AI) si stanno perciò aprendo nuove opportunità per l'individuazione di *biomarker* [6], [7].

Dagli anni Dieci del Duemila il nostro gruppo di ricerca, attivo presso il dipartimento di Filologia Classica e Italianistica dell'Università di Bologna, ha ideato un nuovo metodo che sfrutta tecniche di NLP e AI per individuare i primi segnali di declino cognitivo attraverso l'analisi automatica di registrazioni vocali [8], [9], [10]. L'articolo illustrerà le fondamenta teoriche di tale approccio e descriverà la metodologia di estrazione dei *biomarker* linguistici dal parlato semispontaneo dei pazienti, presentando al contempo alcuni casi di studio.

In particolare, nel §2 verranno cursoriamente inquadrati eziopatogenesi, epidemiologia (§2.1) e correlati linguistici dei Disturbi Neurocognitivi (§ 2.2); nel §3 verrà definito il concetto di “*Biomarker Linguistico Digitale*” (DLB, *Digital Linguistic Biomarker*), ovvero verrà illustrata la possibilità di eseguire *screening* su larga scala e a basso costo mediante l'estrazione automatica di indicatori quantitativi dall'eloquio dei pazienti; il §4 sarà dedicato alla presen-

ReMIND - An ecological, cost-effective AI platform for early detection of prodromal stages of cognitive impairment (European Union – NextGenerationEU, PRIN 2022, 2022YKJ8FP – CUP J53D23008380006) e AKiD - Acoustic and Kinematic Characteristics of Speech in Dementia (European Union – NextGenerationEU, PRIN 2022 PNRR, P2022MMH7R – CUP J53D23017290001).

La nostra gratitudine va dunque ai colleghi che con noi hanno condiviso questo percorso, non soltanto per il lavoro condotto insieme “sul campo”, ma anche per i preziosi momenti di confronto e i numerosi spunti di riflessione. In mero ordine alfabetico ringraziamo dunque Giorgia Albertin, Daniela Beltrami, Paolo Bongioanni, Laura Calzà, Sabina Capellari, Cristina Dolciotti, Marcello Ferro, Enrico Ghidoni, Alessandro Lento, Elena Martinelli, Claudia Marzi, Chiara Meluzzi, Andrea Nadalini, Yuka Naito, Vito Pirrelli, Rema Rossini Favretti, Maria Ranù, Alice Todesco e Shihbingfeng Zhang.

Dedichiamo questo lavoro alla memoria di Rema Rossini Favretti che tanto ha creduto negli anni in questa metodologia di analisi e tanto ha fatto per la nostra formazione durante la nostra carriera accademica. L'articolo è stato ideato e redatto congiuntamente dai due autori. Ai soli fini accademici, Gloria Gagliardi è responsabile dei §§ 1, 2 e 3, mentre Fabio Tamburini ha curato i §§ 4, 5 e 6.

tazione della pipeline computazionale per l'estrazione dei DLBs sviluppata dal nostro gruppo di ricerca; alla rassegna di casi di studio di successo è riservato il § 5. Infine, nel § 6, verranno tratte le conclusioni e delineate possibili linee di ricerca future.

2. Background

2.1. Eziopatogenesi ed epidemiologia dei Disturbi Neurocognitivi

Il termine Disturbo Neurocognitivo Maggiore, comunemente noto come “demenza”, si riferisce a una sindrome clinica di eziologia eterogenea, generalmente a decorso progressivo, caratterizzata da un declino delle capacità cognitive rispetto ad un precedente livello di funzionamento dell'individuo, superiore a quanto ci si possa attendere dal normale processo di invecchiamento e tale da interferire con l'autonomia nelle attività della vita quotidiana. Nei pazienti che ne sono affetti, i sintomi cognitivi (ad esempio deficit di memoria, linguaggio e orientamento visuosaziale) si associano di solito ad alterazioni comportamentali, psicologiche e neurovegetative [11]. Si tratta dunque di una condizione gravemente invalidante, determinata da una disfunzione neurologica acquisita. Sotto il profilo eziopatogenetico è possibile distinguere tra forme primarie, derivanti da processi neurodegenerativi responsabili di una progressiva e irreversibile perdita neuronale (disordini da *misfolding* proteico come la malattia di Alzheimer, strettamente connessi all'invecchiamento), e forme secondarie, che insorgono in conseguenza di patologie potenzialmente trattabili e reversibili che inducono declino cognitivo. Tra queste ultime si annoverano disfunzioni endocrine e metaboliche, malattie infiammatorie del sistema nervoso centrale, stati da carenza nutrizionale, neoplasie e traumi encefalici [12].

La demenza ha un impatto elevatissimo in termini sia epidemiologici, sia di ricadute sul tessuto sociale: secondo le stime dell’Alzheimer’s Disease International, nel 2019 oltre 50 milioni di persone nel mondo erano affette da questa condizione, numero destinato a triplicare entro il 2050 come effetto dell'aumento dell'aspettativa di vita della popolazione [13]. Tali proiezioni dovranno certamente essere riconsiderate nei prossimi anni alla luce dell'impatto che la pandemia da SARS-CoV-2 ha avuto sulla popolazione anziana; sebbene ad oggi non sia ancora disponibile un quadro sistematico sugli effetti del Covid-19 in relazione alle condizioni specifiche che contribuiscono alla vulnerabilità geriatrica nei soggetti con deterioramento cognitivo [14], né sia possibile stimarne con esattezza l'impatto sulla prevalenza delle malattie età-correlate [15], il fenomeno delle demenze non cessa di essere “un rilevante problema di salute pubblica” [16].

In tale contesto, la gestione di un numero sempre crescente di individui fragili rappresenta una sfida cruciale per i sistemi sanitari globali.

I trattamenti farmacologici attualmente disponibili per le demenze primarie sono di natura sintomatica: in altri termini, non sono in grado di agire direttamente sui meccanismi patogenetici alla base dell'accumulo proteico cerebrale responsabile della malattia, e dunque di influenzare il decorso a lungo termine del processo neurodegenerativo, ma si limitano ad attenuarne le manifestazioni cliniche. Tale processo, tuttavia, inizia molti anni prima della comparsa di sintomi clinici evidenti: questa fase preclinica, definita MCI - *Mild Cognitive Impairment* [17] o Disturbo Neurocognitivo Lieve [1], rappresenta una zona “grigia” tra l'invecchiamento fisi-

logico ed una fragilità cognitiva di rilievo patologico, ed offre una finestra strategica per sviluppare trattamenti farmacologici e approcci terapeutici innovativi e mirati [18]. Il miglioramento della tempestività e dell'accuratezza diagnostica rappresenta perciò oggi uno degli obiettivi chiave delle strategie sanitarie internazionali.

La diagnosi di demenza è di competenza neurologica: si basa sull'identificazione di deficit cognitivi oggettivabili mediante test neuropsicologici mirati (e.g., memoria, linguaggio, funzioni visuospatiali, comportamento), affiancata da *neuroimaging* strutturale (TAC o RMN, per evidenziare possibili atrofie cerebrali o lesioni vascolari) e funzionale (PET, al fine di rilevare ipometabolismo in specifiche aree encefaliche) e possibilmente dell'analisi liquorale tramite puntura lombare per il dosaggio dei biomarcatori specifici.

Negli ultimi anni sono stati sviluppati numerosi strumenti psicométrici di valutazione dei deficit cognitivi: tuttavia quelli più comunemente utilizzati nei presidi sanitari – *Mini Mental State Examination* (MMSE, [19]) e *Montreal Cognitive Assessment* (MoCA, [20]) in particolare – presentano limiti significativi nella rilevazione dei primi segni di declino cognitivo [3]. Indubbiamente risultano indispensabili (e rappresentano lo strumento clinico d'elezione) per identificare casi di demenza clinicamente manifesti, ma ancora mostrano, ad oggi, scarsa sensibilità nell'individuare i primissimi segni della fragilità cognitiva [21]. L'esigenza di disporre di test più accurati, sensibili e applicabili su larga scala a costi contenuti è perciò sempre più urgente.

2.2. Il linguaggio nelle demenze dovute a malattie da misfolding proteico

Numerose evidenze suggeriscono la presenza di deficit linguistici in diverse patologie neurodegenerative [5], [22]. Questo riscontro è particolarmente evidente nelle demenze primarie, di cui le alterazioni del linguaggio – a livello sia formale, sia funzionale – rappresentano un sintomo onnipresente, persino nelle fasi iniziali.

Ne è un chiaro esempio la malattia di Alzheimer (AD – *Alzheimer's Dementia*), condizione a cui in letteratura è stato dedicato il maggior spazio, in ragione dell'alta prevalenza epidemiologica. Sebbene il declino della memoria episodica e delle abilità visuospatiali costituisca il nucleo sintomatologico prevalente di tale tipo di demenza, un deterioramento progressivo del linguaggio è costantemente presente [23], [24], [25], [26], [27]. Diversamente dalle afasie classiche di natura vascolare o traumatica, causate da lesioni cerebrali focali, i disturbi del linguaggio osservati nell'AD si inseriscono in un quadro di compromissione cognitiva globale, che coinvolge anche le funzioni esecutive, il ragionamento e le abilità visuocostruttive. I pazienti presentano frequentemente una riduzione della conoscenza semantica e lessicale, difficoltà nel recupero delle parole (i.e., anomia, parafasie semantiche), compromissione della comprensione sia orale che scritta, calo della fluenza verbale e una ridotta densità informativa [28], [29]. Tali sintomi emergono precocemente e tendono a intensificarsi, riflettendo un deterioramento progressivo della memoria semantica, ovvero quella componente della memoria a lungo termine che custodisce conoscenze concettuali, lessicali e culturali [30]. Dal punto di vista fonetico, il linguaggio dei pazienti con AD è caratterizzato, a livello macroscopico, da una diminuzione della velocità di eloquio e da un aumento di esitazioni e disfluenze [31], [32], [33]. L'elaborazione sintattica appare relativamente preservata all'*onset*, sebbene siano stati osservati enun-

ciati strutturalmente meno complessi, contenenti errori morfosintattici con maggior frequenza rispetto ai soggetti di controllo [32], [34], [35]. Infine, a livello discorsivo, i pazienti tendono a produrre testi più brevi, poveri di contenuti rilevanti e caratterizzati da numerosi errori; gli enunciati sono spesso vaghi ed incoerenti, sono stati evidenziati problemi di coesione referenziale, una pianificazione povera e difficoltà di astrazione [34], [36], [37], [38], [39]. Le capacità di ripetizione e articolazione, invece, risultano per lo più preservate. Tuttavia, con l'avanzare della malattia, i sintomi linguistici si aggravano fino a compromettere completamente la comprensione del discorso e a ridurre la produzione verbale a ecolalia e stereotipie.

La presenza di un disturbo linguistico “isolato” (ovvero con risparmio relativo delle altre principali funzioni cognitive, memoria episodica e abilità visuospatiali *in primis*) è l’elemento essenziale per la diagnosi clinica di Afasia Progressiva Primaria (PPA – *Primary Progressive Aphasia*); la sindrome si caratterizza per un esordio caratterizzato da un subdolo e progressivo deterioramento della produzione verbale, evidente sia nella produzione spontanea, sia attraverso una valutazione standardizzata [40]. Sono attualmente riconosciute tre varianti di PPA su base clinica-anatomica [41], [42]: i) una variante non fluente/agrammatica (nfvPPA), tipicamente associata ad atrofia perisilvana anteriore sinistra, che si caratterizza per scarsa fluenza, disprosodia, presenza di errori articolatori, agrammatismo e deficit nella comprensione di frasi sintatticamente complesse; ii) una variante semantica (svPPA), stabilmente associata ad atrofia focale (anche in questo caso prevalentemente sinistra) dei lobi temporali anteriori, mesiali e inferiori, che si manifesta con perdita del vocabolario e compromissione della conoscenza delle parole, inquadrabili in un disturbo più ampio della memoria semantica; iii) una variante logopenica (lvPPA), neuroanatomicamente correlata ad un danno della giunzione temporo-parietale sinistra (sebbene l’estensione e la simmetria dell’atrofia di questa regione varino sensibilmente tra i pazienti), che si distingue per difficoltà nel recupero lessicale e compromissione della memoria di lavoro fonologica, evidente da difficoltà nella ripetizione di frasi.

Al contrario, compromissioni linguistiche non sono tipicamente associate alla demenza a corpi di Lewy (LBD – *Dementia with Lewy bodies*) e alla Demenza da Parkinson (PDD – *Parkinson’s disease dementia*, [43]), se non per quanto riguarda gli aspetti esclusivamente fonetici (in particolar modo articolatori) e prosodici dell’eloquio. Tuttavia, ad un’analisi più specifica, sono stati osservati deficit nei compiti di denominazione e nella fluenza verbale [44], oltre a disturbi di natura pragmatica (i.e., organizzazione narrativa, coerenza tematica) [45].

Attenzione crescente stanno ricevendo i disturbi linguistici nelle fasi precliniche della compromissione cognitiva. Nei soggetti con *Mild Cognitive Impairment* (MCI) si osservano alterazioni simili a quelle della demenza lieve o moderata [46], [47]. I disturbi più frequentemente riportati includono una ridotta fluenza verbale [48] e difficoltà nella denominazione [49], ma è nell’ambito pragmatico che si registrano i maggiori deficit. È stato ampiamente documentato che cambiamenti nel discorso (povertà semantica, incoerenza, difficoltà referenziali, perseverazioni narrative) possono essere tra i segni più precoci della malattia, riscontrabili molti anni prima dell’emergere di altri sintomi cognitivi evidenti [39], e possano rappresentare un importante predittore della progressione dall’MCI in demenza. Questa ultima osservazione è largamente sostenuta da studi longitudinali retrospettivi, che hanno dimostrato come anche in anziani co-

gnitivamente normali in apparenza, sottili alterazioni linguistiche anticipassero l’insorgenza di un deterioramento cognitivo successivamente rivelatosi clinicamente rilevante [23], [50], [51].

3. Marker prodromici della neurodegenerazione: sul ruolo predittivo delle alterazioni linguistiche

Come già anticipato nel § 2.1, gli strumenti psicodiagnostici tradizionali, in particolar modo quelli “carta e matita”, mostrano una bassa sensibilità nell’individuazione di cambiamenti sottili nella cognizione. In aggiunta, pur essendo la loro somministrazione lunga e costosa (i.e., almeno due ore sono necessarie per una valutazione completa durante una visita di approfondimento di secondo livello, neurologica o geriatrica), non consentono di esplorare molti aspetti del linguaggio, a livello segmentale (es. articolatorio) e soprattutto soprasegmentale (i.e., prosodico). La combinazione di bassa ecologicità ed alto costo li rende quindi difficilmente applicabili con finalità di *screening* su larga scala.

Al contrario, crescono le evidenze a sostegno della fattibilità dell’analisi automatica dell’elenco come strumento efficace per affrontare questa sfida. Per quanto esposto nel § 2.2, il linguaggio è infatti un dominio cognitivo soggetto ad erosione fin dalle primissime fasi del processo neuropatologico che conduce alla demenza: essendo il suo processamento radicato in reti neurali ampiamente distribuite [52], anche lievi alterazioni a livello corticale o sottocorticale possono indurre la comparsa di sottili cambiamenti nella qualità della produzione verbali. Tali modifiche sono, il più delle volte, così sfumate da non poter essere rilevate attraverso l’osservazione qualitativa diretta, nemmeno se condotta da un linguista esperto; possono tuttavia essere quantificate in modo molto preciso a partire da testi scritti, registrazioni audio grezze o trascrizioni grazie all’utilizzo di metodi NLP, fungendo così da indicatori per finalità di *screening* o diagnosi di condizioni cliniche [6], [53]. In altri termini, all’interno di tale paradigma metodologico, anche minime perturbazioni del linguaggio possono agire come “biomarcatori digitali” (DLBs – *Digital Linguistic Biomarkers*): “*objective, quantifiable behavioral data that can be collected and measured by means of digital devices, allowing for a low-cost pathology detection, classification and monitoring*” [7].

Si noti che il processo di estrazione dei DLB è completamente non invasivo, rapido ed economico: quest’analisi non richiede infatti infrastrutture o attrezzature mediche complesse né laboratori specializzati ed è in linea di principio è addirittura effettuabile a distanza grazie alle tecnologie di telemedicina già in uso [54].

Da una prospettiva teorica, inoltre, riteniamo non sia irrilevante sottolineare quanto negli ultimi anni il concetto di riproducibilità dei risultati della ricerca si sia affermato come principio chiave di rigore metodologico, non soltanto nel campo delle scienze “dure”, ma anche per la ricerca sociale e comportamentale [55]. Gran parte del lavoro condotto nell’alveo delle scienze del linguaggio, dalla creazione di risorse linguistiche all’analisi dei dati, si basa tradizionalmente su giudizi soggettivi [56]. Sebbene i metodi utilizzati nella ricerca linguistica siano ampiamente accettati e considerati generalmente non controversi nonostante questa limitazione “intrinsic” [57], tale componente soggettiva rappresenta *de facto* una delle principali barriere all’integrazione tra le scienze umane e scienze della salute, dominio in cui l’oggettività è

considerata un requisito epistemologico fondamentale [58]. Certamente permangono ancora numerose criticità che la comunità scientifica è chiamata ad affrontare nei prossimi anni, ma un numero crescente di evidenze empiriche suggerisce che l'utilizzo dei DLBs possa consentire di superare l'*impasse*, e determinare un cambiamento significativo nella pratica clinica: questo approccio intrinsecamente interdisciplinare rappresenta una soluzione promettente alle sfide cliniche che abbiamo illustrato grazie alla capacità di coniugare oggettività e riproducibilità dell'analisi con l'effettiva sostenibilità dei costi a carico dei sistemi sanitari [53].

4. Una *pipeline* computazionale per l'estrazione dei **Biomarker Linguistici Digitali**

La necessità di individuare un metodo efficiente per correlare caratteristiche linguistiche e disturbi mentali con finalità di *screening*, specificamente utilizzabile con parlanti di lingua italiana, ci ha portato a mettere a punto una *pipeline* computazionale in grado di estrarre un ampio insieme di DLB dalle produzioni orali o scritte applicando tecniche di NLP [10].

In particolare, la pipeline è strutturata come un insieme complesso di moduli di elaborazione flessibili che interagiscono tra loro. La Fig. 1 ne illustra la struttura.

Questo strumento può elaborare tre diversi tipi di *input*: registrazioni vocali (come file audio non compresso, WAV), testi scritti grezzi (TXT) o testi pre-elaborati contenenti analisi morfo-sintattiche e sintattiche (memorizzate nel formato standardizzato CoNLL¹). La Tab. 1 elenca l'insieme completo dei DLB prodotti dalla *pipeline* suddivisi in sei gruppi di biomarcatori:

- Feature derivate dalla lingua parlata: DLB acustici (SPE) o ritmici (RHY).
- Feature derivate dal testo, cioè DLB lessicali (LEX), sintattici (SYN), basati sul dizionario psicologico *Linguistic Inquiry and Word Count* (LWC) e di leggibilità (REA).

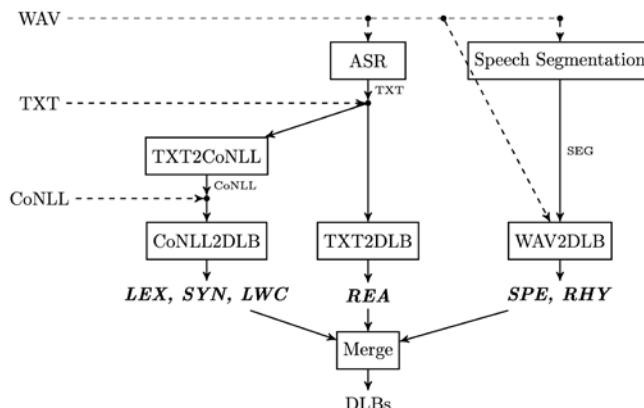


Fig. 1. Struttura della *pipeline* descritta nel § 4. È possibile fornire l'*input* a vari livelli ma, nel caso più generale, solo la registrazione della produzione orale del soggetto (WAV) sarà disponibile e tutti i moduli della *pipeline* dovranno estrarre le feature partendo da questo dato.

¹ <https://universaldependencies.org/format.html>.

Per motivi di spazio, non è possibile illustrare nel dettaglio ciascuno di questi indici. Per una descrizione più precisa e i dettagli sul calcolo il lettore può fare riferimento a Calzà *et al.* [9].

Dato un tipo di *input* specifico – ovvero un file WAV, TXT o CoNLL – la *pipeline* calcola “a cascata” tutti i DLB che possono essere derivati da esso. Il *set* più ampio si ottiene fornendo la registrazione vocale (da sola o accompagnata dalla trascrizione manuale, per evitare eventuali errori prodotti dal modulo di *Automatic Speech Recognition* descritto poco più avanti): per ampiezza e ricchezza di indici estraibili, nonché per applicabilità a contesti clinici reali, è indubbiamente questo il *setting* sperimentale ideale nell’ottica di creare uno strumento idoneo allo *screening* di massa.

Tab. 1. Lista dei DLB estratti automaticamente dalla *pipeline*. Per maggiori dettagli si rinvia a Calzà *et al.* [9].

Indici acustici (SPE)	Indici lessicale (LEX)
– Durata dei segmenti di silenzio	– <i>Content density</i>
– Durata dei segmenti contenenti emissioni vocali	– Incidenza delle Part-of-Speech
– Regolarità temporale dei segmenti sonori	– <i>Reference rate to reality</i>
– <i>Verbal rate</i>	– Incidenza dei deittici personali, spaziali e temporali
– <i>Transformed phonation rate</i>	– Incidenza di pronomi relativi avverbi di negazione
– <i>Standardized phonation time</i>	– Ricchezza lessicale: TTR, Brunet’s & Honore’s Indexes
– <i>Standardized pause rate</i>	– Incidenza dei verbi di azione
– <i>Root mean square energy</i>	– <i>Frequency-of-use tagging</i>
– <i>Pitch</i>	– <i>Propositional idea density</i>
– <i>Spectral centroid</i>	– Numero medio di parole negli enunciati
– <i>Higuchi fractal dimension</i>	
Indici ritmici (RHY)	Linguistic Inquiry and Word Count (LWC)
– Percentuali degli intervalli vocalici	– Metriche linguistiche (e.g., parole per frase)
– Durata degli intervalli vocalici and consonantici	– Parole funzione (e.g., pronomi, articoli, ecc.)
– <i>Pairwise variability index</i>	– Parole legate all’espressione delle emozioni (e.g., positive/negative)
– <i>Variation coefficient</i>	– Processi cognitivi (e.g., insight, certezza, ecc.)
Indici sintattici (SYN)	Indici di Leggibilità (REA)
– Complessità del sintagma nominale (i.e., numero di elementi dipendenti dalla testa nominale)	– Processi percettivi (e.g., vista, udito, tatto)
– <i>Global dependency distance</i>	– Processi biologici (e.g., corpo, salute/malattia, ecc.)
– Complessità Sintattica	– Argomenti personali (e.g., lavoro, svago, denaro, ecc.)
– <i>Syntactic embeddedness</i> : massima profondità dell’albero sintattico	– Parole sociali (e.g., famiglia, amici)
– Lunghezza dell’enunciato	– Punteggiatura
	Indici di Leggibilità (REA)
	– Indici READ-IT per valutazione della leggibilità (a livello lessicale, morfosintattico, sintattico e globale)

Per calcolare i DLB i dati di *input* devono essere pre-elaborati applicando strumenti di analisi vocale di base e tecniche di NLP:

- Conversione da voce a testo. Se l’input consiste solo in una registrazione, la trascrizione del parlato rappresenta un requisito fondamentale per l’estrazione di DLB affidabili relativi al testo. In questo senso, il riconoscimento automatico del parlato, task noto anche come speech-to-text o Automatic Speech Recognition (ASR), riveste un ruolo fondamentale. A questo scopo, abbiamo inserito nella pipeline uno specifico modulo ASR basato sulle più recenti innovazioni nel settore dei Large Language Model (LLM) basati su Transformer [59].
- Segmentazione del parlato. Per estrarre direttamente gli indici fonetici dall’eloquio, i campioni devono essere segmentati. A tal fine, la pipeline utilizza un rilevatore di attività vocale (VAD – Voice Activity Detector) specificamente progettato per l’analisi di interviste che identifica le regioni che contengono parlato rispetto a quelle occupate da silenzi o rumore. Queste segmentazioni forniscono informazioni cruciali per il calcolo di alcune caratteristiche acustiche, come la durata dei segmenti di silenzio, la durata dei segmenti vocali e i loro rapporti. È inoltre necessario ricavare la trascrizione fonetica allineata temporalmente per calcolare la durata di vocali, consonanti e il rapporto dei loro intervalli. L’approccio perseguito nella versione attuale della pipeline prevede la conversione grafema-fonema della trascrizione ortografica e il successivo allineamento temporale della trascrizione fonetica e del segnale acustico.
- Analisi del testo trascritto. Questa fase richiede solitamente alcuni passaggi di pre-elaborazione per ricavare alcune caratteristiche linguistiche di base. Il nostro algoritmo sfrutta il pacchetto software Stanford STANZA, una raccolta di strumenti basati su reti neurali profonde per l’analisi linguistica di numerose lingue, organizzati in una pipeline coerente per l’elaborazione del testo [60]. In particolare, questo strumento esegue i task di tokenizzazione, lemmatizzazione, etichettatura delle parti del discorso (Part of Speech Tagging) e analisi sintattica a livello di frase (modulo TXT2CoNLL in Fig. 1).

Alcuni degli indici elencati nella Tabella 1 sono strettamente correlati all’articolazione del parlato e quindi relativi all’elaborazione fonetica (modulo WAV2DLB). Altri coinvolgono caratteristiche legate al testo e possono essere invece calcolati sia su produzioni scritte che sulle trascrizioni delle sessioni di parlato (moduli CoNLL2DLB e TXT2DLB).

5. Casi di studio di successo

Negli ultimi 15 anni abbiamo applicato con successo versioni progressivamente più avanzate della *pipeline* per studiare i profili comunicativi di vari disturbi mentali.

Il dominio prevalente di interesse è stato ovviamente l’individuazione dei correlati linguistici del deterioramento cognitivo lieve e della demenza a fini diagnostici. In particolare, in un articolo del 2018 con prima firma Beltrami viene descritto il primo tentativo di estrazione e valutazione statistica del potere discriminativo di *biomarker* linguistici digitali dall’eloquio semi-spontaneo di pazienti con disturbo neurocognitivo lieve/moderato e controlli sani bilanciati per età, sesso ed educazione. Lo studio, condotto grazie al finanziamento ricevuto per il progetto OPLON, ha individuato diverse micro-alterazioni dell’eloquio a livello acustico, lessicale e sintattico in grado di distinguere le due coorti, e quindi potenziali indicatori di stadi preclinici di declino cognitivo [8]. In seguito, in Calzà *et al.* [9] e Gagliardi & Tamburini [10], sono stati testati diversi algoritmi di apprendimento automatico (es. *Support Vector Machine*,

Random Forrest e Decision Tree) per classificare automaticamente i parlanti come soggetti sani e MCI, raggiungendo punteggi di F1 elevati, intorno al 75%: una prestazione allo stato dell'arte per questo specifico compito.

La stessa metodologia è stata successivamente applicata a testi scritti prodotti da adolescenti con diagnosi clinica di Anoressia Nervosa e coetanee normopeso [61], ipotizzando che le peculiari caratteristiche psicologiche del disturbo (in particolare il disturbo nella percezione dell'immagine corporea, il pensiero rigido dicotomico e i tratti ansiosi o depressivi associati al profilo cognitivo delle pazienti) determinino *pattern* linguistici particolari. Anche in questo caso, si è dimostrato un ambito cruciale il livello sintattico, in particolare lunghezza della frase, struttura del sintagma nominale e complessità sintattica globale. Abbiamo attribuito questo peculiare modello di erosione linguistica al severo (ma reversibile) deterioramento di natura metabolica che colpisce il sistema nervoso centrale nell'Anoressia Nervosa e più in generale ad una debole coerenza centrale legata a deficit di natura esecutiva.

Infine, abbiamo utilizzato questi stessi marcatori per profilare le capacità comunicative dei bambini in età prescolare, misurando il potere discriminativo degli indizi acustici e ritmici a supporto della classificazione di bambini con Disturbo Primario del Linguaggio (DPL) vs. bambini con sviluppo linguistico e cognitivo normotipico, [62]. A tal fine, abbiamo trascritto manualmente registrazioni vocali raccolte da una coorte bilanciata di sedici bambini con esposizione linguistica monolingue (8 bambini con Disturbo di Linguaggio con deficit confinati al dominio espressivo e 8 coetanei con acquisizione tipica) per evitare la degradazione dei risultati dovuta agli errori introdotti dal modulo ASR tipicamente legati alle peculiari caratteristiche frequentziali ed articolatorie alla voce in età evolutiva. L'analisi ha dimostrato che, persino dopo la riabilitazione terapeutica, alcune caratteristiche spettrali della voce sono in grado di distinguere i bambini con deficit linguistico dai coetanei. A nostro avviso questi risultati, seppur preliminari, sono estremamente rilevanti poiché alcuni degli indici che con maggiore accuratezza distinguono i due gruppi non sono udibili all'orecchio umano, anche se esperto, esulando dalle possibilità dei test neuropsicologici convenzionali.

Ad oggi, l'effettiva relazione tra gli specifici marker linguistici individuati e i sintomi clinici di queste patologie non è completamente chiara: per far luce su questo punto è necessario raccogliere prove più ampie.

6. Conclusioni

I risultati dei nostri studi, e molti altri in letteratura, suggeriscono che le batterie standard di test neuropsicologici tradizionali possano essere efficacemente combinate con analisi di *biomarker* linguistici ricavati dalle produzioni linguistiche parlate di pazienti con strumenti computazionali. Mentre i test neuropsicologici e le valutazioni strutturate hanno un impatto rilevante sulla naturalezza delle risposte del soggetto, l'analisi delle produzioni linguistiche parlate naturali può offrire un test ecologico, non invasivo, economico e affidabile per lo screening dei pazienti a rischio, anche da parte dei medici di medicina generale. Inoltre, la rilevanza statistica di numerosi *biomarker* linguistici (acustici, lessicali e sintattici) suggerisce che un'analisi multidimensionale completa delle competenze comunicative sia preferibile a un'analisi che coinvolga singoli domini.

È possibile prevedere in un prossimo futuro l'estensione in ottica multilingue di questa tecnologia: il sistema che abbiamo sviluppato, specificamente ideato per essere utilizzato su parlanti italofoni, è stato infatti di recente adattato con successo alla lingua inglese; in occasione della Challenge *PROCESS Prediction and Recognition Of Cognitive declinE through Spontaneous Speech*, che si è tenuta nell'ambito della Conferenza Internazionale IEEE ICASSP 2025 - *International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, l'algoritmo si è classificato primo nel task di classificazione [63].

Concludendo, nonostante il nostro gruppo lavori già da parecchi anni in questa direzione e i risultati siano molto incoraggianti, sono certamente necessarie ulteriori indagini per consolidare le ipotesi di partenza e fornire alla comunità medica un dispositivo che sia realmente in grado di fornire un'indicazione rispetto a *outcome* clinicamente significativi: l'espressione dei sintomi è infatti mediata da una miriade di fattori demografici, sociali e cognitivi, che la rende altamente eterogenea al momento della rilevazione. Gli aspetti più critici riguardano senza dubbio l'esigua quantità di dati che i singoli progetti riescono a raccogliere sul campo e l'impossibilità, dovuta alle attuali regolamentazioni in termini di dati personali sensibili, di condividere registrazioni tra gruppi di ricerca differenti, magari in una prospettiva internazionale.

Bibliografia

1. American Psychiatric Association. *Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders: Fifth Edition Text Revision DSM-5-TR™*; American Psychiatric Association Publishing: Washington (DC), 2022.
2. Rasmussen, J.; Langerman, H. Alzheimer's Disease – Why We Need Early Diagnosis. *Degenerative neurological and neuromuscular disease*, 2019, 9, 123-130. doi: 10.2147/DNND.S228939.
3. Alzola, P.; Carnero, C.; Bermejo-Pareja, F.; Sánchez-Benavides, G.; Peña-Casanova, J.; Puertas-Martín, V.; Fernández-Calvo, B.; Contador, I. Neuropsychological Assessment for Early Detection and Diagnosis of Dementia: Current Knowledge and New Insights. *Journal of Clinical Medicine*, 2024, 13(12), 3442. doi: 10.3390/jcm13123442.
4. Calzà, L.; Beltrami, D.; Gagliardi, G.; Ghidoni, E.; Marcello, N.; Rossini-Favretti, R.; Tamburini, F. Should we screen for cognitive decline and dementia? *Maturitas*, 2015, 82(1), 28-35. doi: 10.1016/j.maturitas.2015.05.013.
5. Boschi, V.; Catricalà, E.; Consonni, M.; Chesi, C.; Moro, A.; Cappa, S.F. Connected speech in neurodegenerative language disorders: A review. *Frontiers in Psychology*, 2017, 8, 269. doi: 10.3389/fpsyg.2017.00269.
6. Gagliardi, G. Natural language processing techniques for studying language in pathological ageing: A scoping review. *International Journal of Language & Communication Disorders*, 2024, 59(1), 110-122. doi: 10.1111/1460-6984.12870.
7. Gagliardi, G.; Kokkinakis, D.; Duñabeitia, J. Editorial. Digital linguistic biomarkers: Beyond paper and pencil tests. *Frontiers in Psychology*, 2021, 12, 752238. doi: 10.3389/fpsyg.2021.752238.

8. Beltrami, D.; Gagliardi, G.; Rossini Favretti, R.; Ghidoni, E.; Tamburini, F.; Calzà, L. Speech analysis by natural language processing techniques: A possible tool for very early detection of cognitive decline? *Frontiers in Aging Neuroscience*, 2018, 10, 369. doi: 10.3389/fnagi.2018.00369.
9. Calzà, L.; Gagliardi, G.; Rossini Favretti, R.; Tamburini, F. Linguistic features and automatic classifiers for identifying Mild Cognitive Impairment and dementia. *Computer Speech & Language*, 2021, 65, 101-113. doi: 10.1016/j.csl.2020.101113.
10. Gagliardi, G.; Tamburini, F. (2021). Linguistic biomarkers for the detection of Mild Cognitive Impairment. *Lingue e Linguaggio*, 2021, XX.1: 3-31. doi: 10.1418/101111.
11. Cerejeira, J.; Lagarto, L.; Mukaetova-Ladinska, E. Behavioral and psychological symptoms of dementia. *Frontiers in Neurology*, 2012, 73(3), 719125. doi: 10.3389/fneur.2012.00073.
12. Papagno, C.; Bolognini, N. *Neuropsicologia delle demenze*. Il Mulino: Bologna, 2020.
13. Patterson, C. *The World Alzheimer Report 2018*. Technical report, Alzheimer's Disease International, 2018.
14. Bianchetti, A.; Bellelli, G.; Guerini, F.; Marengoni, A.; Padovani, A.; Rozzini, R.; Trabucchi, M. Improving the care of older patients during the Covid-19 pandemic. *Aging Clinical and Experimental Research*, 2020, 32(9), 1883-1888. doi: 10.1007/s40520-020-01641-w.
15. Andrasfay, T.; Goldman, N. Reductions in US life expectancy during the COVID-19 pandemic by race and ethnicity: Is 2021 a repetition of 2020? *PLoS ONE*, 2022, 17(8), e0272973. doi: 10.1371/journal.pone.0272973.
16. WHO and Alzheimer's Disease International. *Dementia: a public health priority*. Geneva: World Health Organization: Geneva, 2012.
17. Petersen, R.C. Clinical practice. Mild Cognitive Impairment. *New England Journal of Medicine*, 2011, 364(23), 2227-2234. doi: 10.1056/NEJMcp0910237.
18. Ritchie, K.; Ropacki, M.; Albala, B.; Harrison, J.; Kaye, J.; Kramer, J.; Randolph, C.; Ritchie, C.W. Recommended cognitive outcomes in preclinical Alzheimer's disease: Consensus statement from the European Prevention of Alzheimer's Dementia project. *Alzheimer's & Dementia*, 2017, 13, 186-195. doi: 10.1016/j.jalz.2016.07.154.
19. Folstein, M.; Folstein, S.E.; McHugh, P.R. "Mini-Mental State": a practical method for grading the cognitive state of patients for the clinician. *Journal of Psychiatric Research*, 1975, 12, 189-198. doi: 10.1016/0022-3956(75)90026-6.
20. Nasreddine, Z.S.; Phillips, N.A.; Bédirian,V.; Charbonneau, S.; Whitehead, V.; Collin, I.; Cummings, J.L.; Chertkow, H. The Montreal Cognitive Assessment, MoCA: A brief screening tool for Mild Cognitive Impairment. *Journal of the American Geriatrics Society*, 2005, 53(4), 695-699. Doi: 10.1111/j.1532-5415.2005.53221.x.
21. Mortamais, M.; Ash, J.A.; Harrison, J.; Kaye, J.; Kramer, J.; Randolph, C.; Pose, C.; Albala, B.; Ropacki, M.; Ritchie C.W.; Ritchie K. Detecting cognitive changes in preclinical Alzheimer's disease: A review of its feasibility. *Alzheimer's & Dementia*, 2017, 13, 468-492. doi: 10.1016/j.jalz.2016.06.2365.
22. Gumus, M.; Koo, M.; Studzinski, C.M.; Bhan, A.; Robin, J.; Black S.E. (2024). Linguistic changes in neurodegenerative diseases relate to clinical symptoms. *Frontiers in Neurology*, 2024 15, 1373341. doi: 10.3389/fneur.2024.1373341.

23. Ahmed, S.; Haigh, A.M.F.; De Jager, C.A.; Garrard P. Connected speech as a marker of disease progression in autopsy-proven Alzheimer's disease. *Brain*, 2013, 136 (12), 3727-3737. doi: 10.1093/brain/awt269.
24. Forbes-McKay, K.; Shanks, M.F.; Venneri A. Profiling spontaneous speech decline in Alzheimer's disease: a longitudinal study. *Acta Neuropsychiatrica*, 2013, 25(6), 320-327. doi:10.1017/neu.2013.16.
25. Olmos-Villaseñor, R.; Sepulveda-Silva, C.; Julio-Ramos, T.; Fuentes-Lopez, E.; Toloza-Ramirez, D.; Santibañez, R.A.; Copland, D.A.; Mendez-Orellana, C. Phonological and Semantic Fluency in Alzheimer's Disease: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Journal of Alzheimer's disease*, 2023, 95(1), 1-12. doi: 10.3233/JAD-221272.
26. Szatloczki, G.; Hoffmann, I.; Vincze, V.; Kalman, J.; Pakaski, M. Speaking in Alzheimer's disease, is that an early sign? Importance of changes in language abilities in Alzheimer's disease. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 2015, 7, 195. doi: 10.3389/fnagi.2015.00195.
27. Williams, E.; McAuliffe, M.; Theys, C. Language changes in Alzheimer's disease: A systematic review of verb processing. *Brain and Language*, 2021, 223, 105041. doi: 10.1016/j.bandl.2021.105041.
28. Catricalà, E.; Della Rosa, P.; Plebani, V.; Perani, D.; Garrard, P.; Cappa, S.F. Semantic feature degradation and naming performance. Evidence from neurodegenerative disorders. *Brain & Language*, 2015, 147, 5865. doi: 10.1016/j.bandl.2015.05.007.
29. Fraser, K.C.; Meltzer, J.A.; Rudzicz, F. Linguistic features identify Alzheimer's Disease in narrative speech. *Journal of Alzheimer's Disease*, 2016, 49, 407-422. doi: 10.3233/JAD-150520.
30. Tulving, E. (1972). *Episodic and Semantic Memory*. In E. Tulving & W. Donaldson (eds.), *Organization of Memory*; Academic Press: New York, 1972, pp. 381-403.
31. Kavé, G.; Goral, M. Word retrieval in connected speech in Alzheimer's disease: a review with meta-analyses. *Aphasiology*, 2017, 32(1), 4-26. doi: 10.1080/02687038.2017.1338663.
32. Sajjadi, S.A.; Patterson, K.; Tomek, M.; Nestor, P.J. Abnormalities of connected speech in semantic dementia vs. Alzheimer's disease. *Aphasiology*, 2012, 26(6), 847-866. Doi: 10.1080/02687038.2012.654933.
33. Young, C.B.; Smith, V.; Karjadi, C.; Grogan, S.M.; Ang, T.F.A.; Insel, P.S.; Henderson, V.W.; Sumner, M.; Poston, K.L.; Au, R.; Mormino, E.C. Speech patterns during memory recall relates to early tau burden across adulthood. *Alzheimers Dement*, 2024, 20(4), 2552-2563. doi: 10.1002/alz.13731.
34. Chapin, K.; Clarke, N.; Garrard, P.; Hinzen, W. A finer-grained linguistic profile of Alzheimer's disease and Mild Cognitive Impairment. *Journal of Neurolinguistics*, 2022, 6, 101069. doi: 10.1016/j.jneuroling.2022.101069.
35. Kemper, S.; LaBarge, E.; Ferraro, H.; Richard Cheung, F.; Cheung, H.; Storandt, M. On the preservation of syntax in Alzheimer's Disease. *Archives of neurology*, 1993, 50(1), 81-86. doi: 10.1001/archneur.1993.00540010075021.
36. Albertin, G.; Martinelli, E. Exploring the Use of Cohesive Devices in Dementia within an Elderly Italian Semi-spontaneous Speech Corpus. In Dell'Orletta, F.; Lenci, A.; Montemagni, S.; Sprugnoli, R. (Eds.), *Proceedings of the Tenth Italian Conference on Computational Lin-*

- guitics (CLiC-it 2024), CEUR Workshop Proceedings 3878; CEUR-WS Team: Aachen, 2024, pp. 13-19. <https://aclanthology.org/2024.clicit-1.3/>.
37. Chapman, S.B.; Zientz, J.; Weiner, M.F.; Rosenberg, R.N.; Frawley, W.H.; Burns, M.H. Discourse changes in early Alzheimer disease, Mild Cognitive Impairment, and normal aging. *Alzheimer Disease & Associated Disorders*, 2002, 16(3), 177-186. doi: 10.1097/00002093-200207000-00008
 38. de Lira, J.O.; Cianciarullo Minett, T.S.; Ferreira Bertolucci, P.H.; Ortiz, K.Z. Evaluation of macrolinguistic aspects of the oral discourse in patients with Alzheimer's disease. *International Psychogeriatrics*, 2019, 31(9), 1343-1353. doi: 10.1017/S1041610218001758.
 39. Drummond, C.; Coutinho, G.; Fonseca, R.P.; Assunção, N.; Tedeschi, A.; de Oliveira-Souza, R.; Moll, J.; Tovar-Moll, F.; Mattos, P. Deficits in narrative discourse elicited by visual stimuli are already present in patients with Mild Cognitive Impairment. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 2015, 7, 96. doi: 10.3389/fnagi.2015.00096.
 40. Mesulam, M. Primary Progressive Aphasia: A language-based dementia. *New England Journal of Medicine*, 2003, 349(16), 1535-1542. doi: 10.1056/NEJMra022435.
 41. Belder, C.R.S.; Marshall, C.R.; Jiang, J.; Mazzeo, S.; Chokesuwattanaskul, A.; Rohrer, J.D.; Volkmer, A.; Hardy, C.J.D.; Warren, J.D. Primary progressive aphasia: six questions in search of an answer. *Journal of Neurology*, 2024, 271(2), 1028-1046. doi: 10.1007/s00415-023-12030-4.
 42. Gorno-Tempini, M.L.; Hillis, A.; Weintraub, S.; Kertesz, A.; Mendez, M.; Cappa, S.F.; Ogar, J.; Rohrer, J.D.; Black, S.E.; Boeve, B.; Manes, F.; Dronkers, N.; Vandenberghe, R.; Rascoovsky, K.; Patterson, K.; Miller, B.L.; Knopman, D.S.; Hodges, J.R.; Mesulam, M.; Grossman, M. Classification of Primary Progressive Aphasia and its variants. *Neurology*, 2011, 76, 1006-1014. doi: 10.1212/WNL.0b013e31821103e6.
 43. Prasad, S.; Katta, M.R.; Abhishek, S.; Sridhar, R.; Valisekka, S.S.; Hameed, M.; Kaur, J.; Walia, N. Recent advances in Lewy body dementia: A comprehensive review. *Disease-a-month*, 2023, 69(5), 101441. doi: 10.1016/j.disamonth.2022.101441.
 44. Bourgeais, A.; Trogneux, L.; Bella, S.B.; Comon, M.; Renard, A.; Balageas, A.C. Troubles du langage dans la maladie à corps de Lewy: une revue de la littérature. *Gériatrie et psychologie neuropsychiatrie du vieillissement*, 2024, 22(3), 365-371. doi: 10.1684/pnv.2024.1185.
 45. Ash, S.; McMillan, C.; Gross, R.G.; Cook, P.; Morgan, B.; Boller, A.; Dreyfuss, M.; Siderowf, A.; Grossman, M. The organization of narrative discourse in Lewy body spectrum disorder. *Brain & Language*, 2011, 119, 30-41. doi: 10.1016/j.bandl.2011.05.006.
 46. Mueller, K.D.; Hermann, B.; Mecollari, J.; Turkstra, LS. Connected speech and language in mild cognitive impairment and Alzheimer's disease: A review of picture description tasks. *Journal of clinical and experimental neuropsychology*, 2018, 40(9), 917-939. doi: 10.1080/13803395.2018.1446513.
 47. Taler, V.; Phillips, N.A. Language performance in Alzheimer's disease and Mild Cognitive Impairment: A comparative review. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 2008, 30(5), 501-556. doi: 10.1080/13803390701550128.
 48. Tsantali, E.; Economidis, D.; Tsolaki, M. Could language deficits really differentiate Mild Cognitive Impairment (MCI) from mild Alzheimer's disease? *Archives of gerontology and geriatrics*, 2013, 57(3), 263-270. doi: 10.1016/j.archger.2013.03.011.

49. Ahmed, S.; Arnold, R.; Thompson, S.A.; Graham, K.S.; Hodges, J.R. Naming of objects, faces and buildings in Mild Cognitive Impairment. *Cortex*, 2008, 44(6), 746-752. doi: 10.1016/j.cortex.2007.02.002.
50. Berisha, V.; Wang, S.; LaCross, A.; Liss, J. Tracking discourse complexity preceding Alzheimer's disease diagnosis: a case study comparing the press conferences of Presidents Ronald Reagan and George Herbert Walker Bush. *Journal of Alzheimer's disease*, 2015, 45(3), 959-963. doi: 10.3233/JAD-142763.
51. Ouhaj, A.; Wilcock, G.K.; Smith, A.D.; de Jager, C.A. Predicting the time of conversion to MCI in the elderly: role of verbal expression and learning. *Neurology*, 2009, 73(18), 1436-1442. doi: 10.1212/WNL.0b013e3181c0665f.
52. Fedorenko, E.; Ivanova, A.; Regev, T. The language network as a natural kind within the broader landscape of the human brain. *Nature Reviews Neuroscience*, 2024, 25, 289-312. doi: 10.1038/s41583-024-00802-4.
53. Gagliardi, G. The bodily substrate of language: insights from clinical linguistics. *Lingue e Linguaggio*, 2025, XXIV.1: 41-59.
54. König, A.; Satt, A.; Sorin, A.; Hoory, R.; Derreumaux, A.; David, R.; Robert, P.H. Use of speech analyses within a mobile application for the assessment of cognitive impairment in elderly people. *Current Alzheimer Research*, 2018, 2(15), 120-129. doi: 10.2174/1567205014666170829111942
55. Berez-Kroeker, A.L.; Gawne, L.; Kung, S.S.; Kelly, B.F.; Heston, T.; Holton, G.; Pulsifer, P.; Beaver, D.I.; Chelliah, S.; Dubinsky, S.; Meier, R.P.; Thieberger, N.; Rice, K.; Woodbury, A.C. Reproducible research in linguistics: A position statement on data citation and attribution in our field. *Linguistics*, 2018, 56(1), 1-18. doi: 10.1515/ling-2017-0032.
56. Artstein, R.; Poesio, M. Inter-coder agreement for computational linguistics. *Computational Linguistics*, 2008, 34(4), 555-596. doi: 10.1162/coli.07-034-R2.
57. Aroyo, L.; Welt, C. Truth is a lie: Crowd truth and the seven myths of human annotation. *AI Magazine*, 2015, 36(1), 15-24. doi: 10.1609/aimag.v36i1.2564.
58. Boudreau, J.D.; Cassell, E.J.; Fuks, A. The clinical method and subjectivity in medicine. In *Physicianship and the Rebirth of Medical Education*; Oxford University Press: Oxford, 2018, pp. 99-110. doi: 10.1093/oso/9780199370818.003.0007.
59. Tamburini, F. (2022). *Neural Models for the Automatic Processing of Italian*; Patron: Bologna, 2022.
60. Qi, P.; Zhang, Y.; Zhang, Y.; Bolton, J.; Manning, C.D. (2020). Stanza: A Python natural language processing toolkit for many human languages. In A. Celikyilmaz, A.; Wen, T.H. (Eds.), *Proceedings of the 58th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics: System Demonstrations*; ACL: Stroudsburg (PA) 2020; pp. 101-108. doi: 10.18653/v1/2020.acl-demos.14.
61. Cuteri, V.; Minori, G.; Gagliardi, G.; Tamburini, F.; Malaspina, E.; Gualandi, P.; Rossi, F.; Moscano, M.; Francia, V.; Parmeggiani, A. Linguistic feature of anorexia nervosa: a prospective case-control pilot study. *Eating and weight disorders*, 2022, 27(4), 1367-1375. doi: 10.1007/s40519-021-01273-7.

62. Gagliardi, G.; Tamburini, F.; Innocenti, M. Can speech-based measures support developmental language disorder identification? An explorative study. *Studi Italiani di Linguistica Teorica e Applicata*, 2023, LII (2), 383-401.
63. Zhang, S.; Khlif, N.; Ferro, M.; Gagliardi, G.; Tamburini, F. Cognitive decline detection using DLB extraction pipelines. In *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, 2005, 1-2. Piscataway (New Jersey): IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICASSP49660.2025.10890866>.

La difficile sfida contro le frane: riflessioni dopo maggio 2023

Matteo Berti

Dipartimento di Scienze Biologiche, Geologiche e Ambientali
Alma Mater Studiorum - Università di Bologna

Contributo presentato da Gian Battista Vai

Abstract

Landslides are complex phenomena influenced by interacting geological, geomorphological, hydrological, land use, and climatic factors. Predicting and managing them is highly uncertain, as they require systematic data collection and robust scientific methods. The extreme rainfall in Emilia-Romagna (Italy) in May 2023 clearly illustrated these challenges: two exceptional storms within two weeks, with a combined return period over 500 years, triggered more than 80,000 failures over an area exceeding 1,000 km², with severe social and economic consequences. This event highlights the urgent need for a science-based, data-driven approach to landslide risk management, relying on accurate field inventories, regularly updated hazard maps, and explicit consideration of climate change. Enhancing monitoring systems and planning informed mitigation strategies is essential to reduce vulnerability in an evolving environmental context.

Keywords

Landslides, Emergency management, Mapping, Susceptibility, Emilia-Romagna

1. Introduzione

Il dissesto idrogeologico rappresenta uno dei principali problemi ambientali in Italia. Secondo un recente studio di ISPRA, la percentuale di comuni a rischio frana supera il 90% e gli impatti diretti e indiretti sono estremamente pesanti, sia in termini economici che sociali [1]. Per il solo 2023, il CNR-IRPI di Perugia ha quantificato danni per oltre 1 miliardo di euro, con 10 vittime e quasi 1700 sfollati [2]. A questo si aggiunge la chiara evidenza di un incremento nella frequenza e intensità dei fenomeni franosi, legata alla maggiore frequenza degli eventi estremi nel contesto del cambiamento climatico [3, 4, 5]. È quindi necessario un potenziamento delle nostre capacità di gestione e previsione del rischio da frana, in modo da affrontare con la dovuta preparazione questa sfida.

La previsione delle frane rimane, purtroppo, molto difficile. Le frane sono infatti fenomeni naturali complessi controllati da molteplici fattori: assetto geologico dei versanti, caratteristiche meccaniche dei terreni e delle rocce, uso del suolo, caratteristiche morfologiche, condizioni idrauliche e idrogeologiche. In letteratura sono stati proposti numerosi approcci di tipo euristico, statistico e fisicamente basato per stimare la suscettibilità a frana [6, 7, 8]. Tali metodi vengono in genere calibrati e validati analizzando le frane innescate in un determinato territorio a seguito di specifici eventi meteorologici. La conoscenza empirica acquisita attraverso lo studio di eventi storici e attuali consente di individuare i fattori predisponenti all'instabilità e di sviluppare modelli previsionali.

Questo approccio rappresenta un'applicazione del principio dell'attualismo, secondo cui i processi che hanno agito nel passato continueranno ad agire anche in futuro seguendo le stesse leggi fisiche e naturali. Tuttavia, estendere i risultati ottenuti in un'area specifica ad altri contesti risulta difficile a causa della notevole variabilità geologica e geomorfologica locale. Inoltre, i cambiamenti climatici in atto riducono l'affidabilità delle previsioni basate esclusivamente su eventi passati. Per queste ragioni, la previsione delle frane rimane prevalentemente di tipo probabilistico-qualitativo (poco probabile, probabile, molto probabile), lasciando tecnici e decisori di fronte a scelte spesso complesse e non prive di incertezze.

Tali problematiche sono emerse con forza anche in occasione della drammatica alluvione che ha interessato la Regione Emilia-Romagna nel maggio 2023. Gli effetti sul territorio sono stati del tutto inattesi. Mai si era visto, almeno negli ultimi 100 anni, l'innesto di un numero così elevato di frane, e mai su un'area così vasta. Sotto questo punto di vista, l'evento è stato certamente imprevedibile. A due anni dall'evento, sono ancora numerose le domande senza risposta. Cosa ha prodotto un disastro di questa portata? Ci saranno altri eventi simili in futuro? Come possiamo difenderci dalle frane? Non abbiamo una risposta definitiva a queste domande, ma quanto avvenuto a maggio 2023 merita di essere analizzato.

2. L'evento meteo di maggio 2023

Nel mese di maggio 2023, il settore centro-orientale della Regione Emilia-Romagna è stato colpito da due forti eventi di precipitazione. Il primo evento è avvenuto dal 1 al 3 maggio. In circa 48 ore sono caduti oltre 200 mm di pioggia [9], con un picco sulla parte occidentale della

Romagna. La Commissione tecnico-scientifica incaricata dalla Regione Emilia-Romagna di fare luce sul disastro ha stimato per questa precipitazione un tempo di ritorno superiore ai 100 anni [10]. Questo primo evento ha causato alluvioni e frane in Romagna, generando numerose criticità sia in pianura che nelle aree collinari e montane. È stato però il secondo evento a creare un vero disastro.

I giorni 16-17 maggio, una precipitazione con una cumulata di oltre 250 mm in 48 ore ha colpito praticamente la stessa area. Il tempo di ritorno di questa precipitazione è stato calcolato in oltre 200 anni [10]. La combinazione di questi due eventi è stata del tutto eccezionale. In due settimane è caduto oltre la metà del quantitativo d'acqua annuale, ed il tempo di ritorno dell'evento combinato è stato stimato in oltre 500 anni.

Gli effetti al suolo sono stati devastanti. In pianura sono avvenute decine di rotte arginali che hanno causato estese inondazioni, in montagna si sono innescate oltre 80.000 frane. Le frane hanno interessato una zona di oltre 1000 km², con un'area epicentrale che si estende dalla valle del Santerno a quella del Bidente. Migliaia di frane hanno colpito strade provinciali, comunali e vicinali, isolando intere vallate e creando enormi problemi nei soccorsi. Centinaia di abitazioni sono state colpite, minacciate, o delocalizzate perché non più raggiungibili. A distanza di due anni, molte di queste ferite sono ancora aperte.

3. Le prime reazioni

La portata straordinaria dell'evento è apparsa subito evidente sia ai cittadini sia agli amministratori locali. Nelle prime settimane, l'attenzione si è concentrata sulle attività di soccorso e di assistenza emergenziale coordinate dall'Agenzia Regionale di Protezione Civile. Si è trattato di operazioni complesse, che hanno richiesto un dispiegamento eccezionale di mezzi e il supporto dell'esercito [11]. Terminata la fase più critica dell'emergenza, il dibattito pubblico si è rapidamente spostato sull'individuazione delle responsabilità e sulla ricerca di soluzioni per il futuro: *Perché l'evento non era stato previsto? Chi ha commesso errori? Quali interventi sono ora necessari?*

È naturale che i cittadini si pongano queste domande. I disastri naturali sono eventi rari e traumatici, che generano paura e difficoltà ad essere accettati. Cercare una causa, una responsabilità e una possibile soluzione è un modo per affrontare l'incertezza e guardare al futuro con minore angoscia. Sono interrogativi seri, ai quali è fondamentale rispondere con rigore e ponderazione, anche per rispetto verso chi è stato direttamente colpito.

Purtroppo, però, le cose vanno spesso in modo diverso. È ormai consuetudine che, subito dopo un disastro, i media riportino dichiarazioni di tecnici, addetti ai lavori o accademici che sembrano avere già tutte le risposte. Ecco alcune affermazioni pubblicate in testate nazionali e locali nei giorni immediatamente successivi all'evento: "il disastro è stato causato dall'abbandono delle zone montuose e collinari, e dalla conseguente mancanza di manutenzione"; "l'assenza di foreste ha esposto i versanti al franamento"; "nel caso dell'Emilia-Romagna, la natura argillosa dei terreni è un fattore determinante". Non sono mancate neppure soluzioni semplicistiche: "andrebbero costruite delle strutture di cemento armato per fermare le frane".

Eppure, basta osservare le fotografie delle aree colpite o avere minime conoscenze della geologia locale per mettere in dubbio tali affermazioni. Ad esempio, le zone colpite sono tutt'altro

che abbandonate: al contrario, ospitano attività agricole di pregio, in particolare frutteti. Inoltre, le frane hanno interessato tanto terreni agricoli quanto versanti densamente boscati, indipendentemente dal tipo di bosco. Infine, i terreni coinvolti nei dissesti hanno una composizione prevalentemente sabbioso-limosa, non argillosa.

Il punto centrale non è però stabilire se tali affermazioni siano vere o false. Il punto è sottolineare che nessuno – nemmeno il maggiore specialista di frane – può rispondere a queste domande senza aver prima studiato a fondo l'evento. Come si può indicare la causa di una frana prima ancora di averla identificata, mappata e analizzata? E come si possono proporre soluzioni per un problema che non è stato ancora valutato? Sarebbe come se un medico formulasse una diagnosi e prescrivesse una terapia senza neppure visitare il paziente. Eppure, per qualche ragione, questo approccio sembra essere tollerato quando si parla di frane.

Le frane, come già evidenziato, sono sistemi complessi governati da molti fattori, e la mente umana fatica ad analizzare razionalmente i sistemi complessi. Come osserva Daniel Kahneman, psicologo cognitivo e premio Nobel per l'economia nel 2022, l'essere umano è incline a trarre conclusioni sulla base di informazioni limitate, spesso in modo distorto [12]. È facile, ad esempio, lasciarsi condizionare da un'impressione iniziale, come l'osservazione di alcune frane su campi arati a ritocchino, e restare ancorati all'idea che il tipo di aratura sia una causa fondamentale del dissesto (effetto ancoraggio), cercando poi conferme che rafforzino questa convinzione (bias di conferma). Allo stesso modo, è frequente la tendenza a semplificare eccessivamente problemi complessi, saltando direttamente a conclusioni affrettate (bias della semplificazione). Gli studi di scienze cognitive mostrano poi come la tendenza a sopravvalutare le proprie competenze sia spesso maggiore proprio in chi è meno esperto (effetto Dunning-Kruger).

È chiaro che un tecnico esperto possa, nell'immediato, fornire una valutazione plausibile e verosimile. Tuttavia, rimane comunque una semplice opinione. Nella stabilità dei versanti ogni situazione è unica perché uniche sono le combinazioni tra fattori geologici, geomorfologici, idrogeologici e climatici che possono portare un versante a rottura. Una risposta affrettata e inesatta alle domande che abbiamo visto può tradursi in decisioni sbagliate riguardo alle opere da realizzare, alla priorità degli interventi o alla pianificazione futura del territorio. Per rispondere in modo rigoroso è necessario rimboccarsi le maniche e affrontare il problema con scrupolosità scientifica.

4. La mappatura come base di conoscenza scientifica delle frane

Nel metodo scientifico sperimentale, il pilastro fondamentale è l'osservazione: ogni affermazione deve poggiare su dati verificabili e, idealmente, essere confermata tramite esperimenti riproducibili. Nel caso delle frane, la riproduzione sperimentale degli eventi è praticamente impossibile, sia per la complessità dei processi coinvolti sia per l'imprevedibilità delle condizioni naturali in cui avvengono. Anche le analisi numeriche o fisiche che tentano di simulare questi fenomeni richiedono molte semplificazioni e comportano inevitabili incertezze. Per questa ragione, il dato osservato sul campo rappresenta l'elemento più importante e imprescindibile.

Nel caso di eventi come quello del maggio 2023, il dato fondamentale è la carta delle frane, che costituisce la base di ogni analisi. La carta delle frane deve includere tutti i dissesti inne-

scati dall'evento, distinguendoli accuratamente da quelli preesistenti. Ogni frana deve essere mappata con elevata precisione e classificata in base alla tipologia di movimento. La qualità e la completezza di queste informazioni sono cruciali, poiché la carta delle frane viene poi incrociata con altri dati territoriali per individuare i fattori che hanno causato il dissesto. È importante sottolineare che diverse tipologie di frana rispondono a fattori diversi e vanno quindi analizzate separatamente. Inoltre, la precisione con cui vengono tracciati i contorni è essenziale, poiché variabili territoriali come la pendenza, la litologia o l'uso del suolo possono cambiare sensibilmente anche su scale molto ridotte.

In generale, la realizzazione di una carta delle frane può avvenire attraverso un approccio manuale oppure mediante metodi automatici. L'approccio manuale, pur richiedendo tempi lunghi e risultando inevitabilmente influenzato da una certa soggettività, garantisce di solito una maggiore accuratezza e permette di riconoscere anche frane dalla morfologia complessa. Inoltre, l'analisi diretta di ogni singolo fenomeno obbliga l'operatore a esaminare nel dettaglio l'evento, favorendo una comprensione più approfondita dei processi che lo hanno generato. I metodi automatici, al contrario, sono molto più rapidi e si basano su criteri oggettivi e riproducibili. Tuttavia, l'accuratezza complessiva tende a essere inferiore, poiché gli algoritmi disponibili possono produrre sia falsi positivi (individuare frane inesistenti) sia falsi negativi (non rilevare frane effettivamente presenti).

Non esiste, quindi, un approccio universalmente migliore: la scelta tra mappatura manuale e automatica, e il livello di dettaglio con cui eseguirla, dipende dal contesto specifico, dagli obiettivi dello studio, dalla risoluzione e qualità dei dati disponibili, nonché dalle risorse economiche e umane a disposizione.

Nel caso dell'evento di maggio 2023, l'esigenza principale era ottenere una mappatura il più possibile accurata. L'evento aveva infatti generato un numero estremamente elevato di frane piccole e piccolissime, molte delle quali avevano interessato strade, edifici e infrastrutture. Rilevare anche i fenomeni di dimensioni molto ridotte era quindi indispensabile per stimare correttamente i danni. Allo stesso tempo, era fondamentale distinguere con precisione le diverse tipologie di movimento, così da poter pianificare interventi adeguati alle caratteristiche dei dissesti. Per queste ragioni si è optato per un approccio manuale alla mappatura.

L'identificazione delle frane è stata effettuata confrontando fotografie aeree ad alta risoluzione pre-evento (AGEA 2020, 0,2 m/pixel) (Fig. 1A)¹ con quelle post-evento, acquisite in gran parte il 23 maggio 2023 (CGR, 0,2 m/pixel) (Fig. 1B). Le immagini sono state analizzate sia in modalità ottica (3 bande RGB) sia in falso colore (Near Infrared, NIR) (Fig. 1C), così da evidenziare con maggiore facilità le aree interessate da perdita di vegetazione, generalmente associata alla presenza di frane. La classificazione di ciascun dissesto è stata poi supportata dall'uso del visualizzatore 3D della Regione Emilia-Romagna (Fig. 1D).

L'intero lavoro è stato svolto in collaborazione tra il Servizio Geologico della Regione Emilia-Romagna, l'Università di Bologna e l'Università di Modena e Reggio Emilia, coinvolgendo 12 persone per un periodo di circa sei mesi [13]. Si è trattato, quindi, di un'attività lunga e impegnativa. Il risultato è una carta inventario che comprende oltre 80.000 poligoni di frana, ciascuno classificato

¹ Tutte le immagini sono pubblicate a colori nell'edizione online degli *Annales*.

in base alla tipologia di movimento. Il dataset è stato reso disponibile senza restrizioni e può essere scaricato al link <https://zenodo.org/records/13742643>.

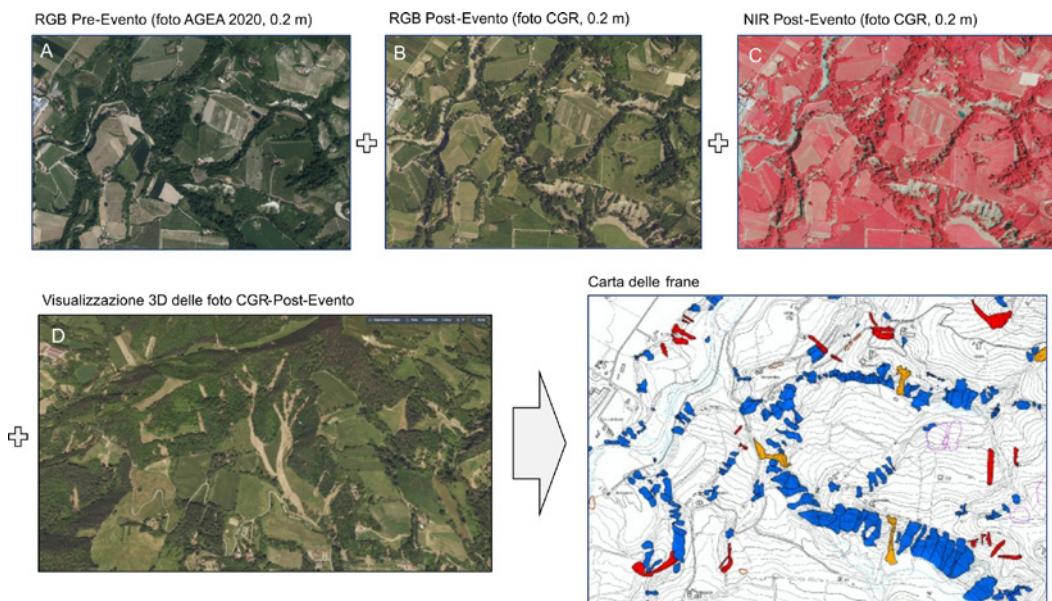


Fig. 1. Procedura utilizzata per la realizzazione della carta delle frane dell’evento di maggio 2023.

5. Cosa dicono i dati

Alcune semplici analisi della carta inventario permettono di chiarire distribuzione, tipologia e cause delle frane di maggio 2023.

5.1. Distribuzione delle frane

La Fig. 2 mostra una panoramica delle frane censite, indicate come punti (Fig. 2A) e come mappa di densità (Fig. 2B). Le due mappe mostrano anche le isoline della precipitazione cumulata nei due eventi del 1-3 e 16-17 maggio (linee curve a tratteggio). Si osserva una forte, ma non perfetta, correlazione tra la pioggia cumulata e la densità di frane. Nella parte orientale della regione (Romagna), l’isoleta dei 300 mm di pioggia delimita approssimativamente l’area con densità superiore a 40 frane/km². Al contrario, nella parte occidentale (Emilia), la densità è inferiore a 40 frane/km² pur avendo ricevuto la stessa quantità di pioggia. Questa differenza è attribuibile ai diversi contesti geologici.

La Romagna è dominata dalla Formazione Marnoso-Arenacea, una successione torbiditica costituita da alternanze di arenaria e marne che dà luogo a pendii ripidi e suoli di alterazione sabbiosi-limosi. Questi terreni relativamente permeabili tendono a saturarsi anche con precipitazioni intense e di breve durata. L’Emilia, invece, presenta una geologia più complessa con ampie zone caratterizzate da terreni di natura argillosa, che essendo molto meno permeabili richiedono precipitazioni più prolungate per raggiungere condizioni critiche di stabilità.

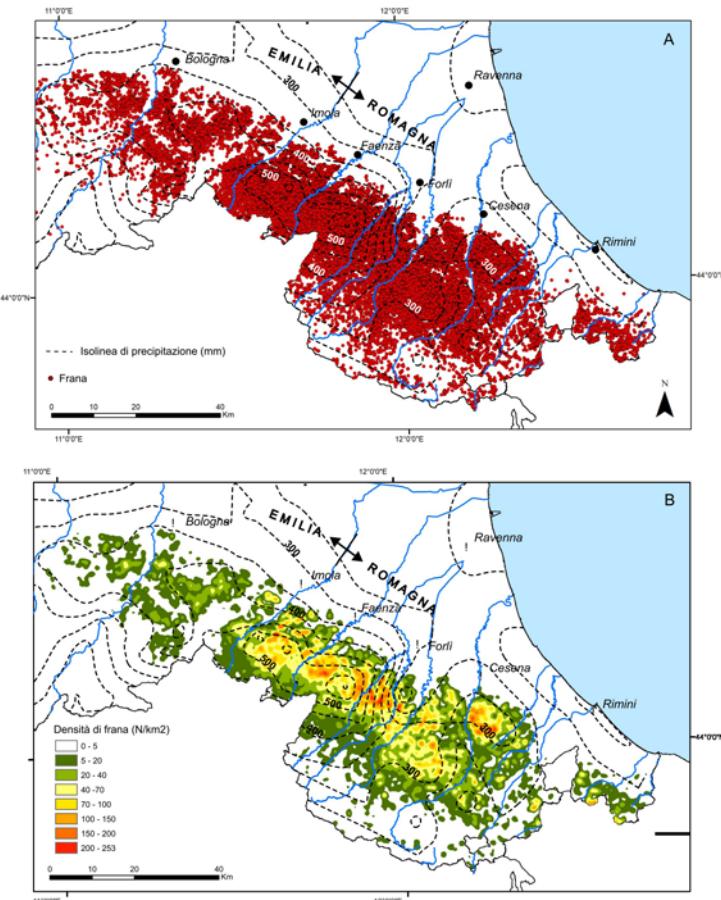


Fig. 2. A) Distribuzione delle frane di maggio 2023, indicate come punti. B) Mappa di densità di frane per km² (modificato da [13]).

In Romagna, la densità di frane ha raggiunto valori impressionanti, superando le 250 frane per km². L'area più colpita, con oltre 40 frane per km², si estende per circa 800 km² e corrisponde al settore esterno della Formazione Marnoso-Arenacea. Circa il 64% delle frane si è verificato all'interno di questa zona. L'indice di franosità, cioè il rapporto tra superficie franata e superficie totale, raggiunge qui valori compresi tra 20% e 25%. Si tratta di numeri particolarmente rilevanti, che non erano mai stati registrati negli ultimi cento anni per i quali disponiamo di informazioni storiche accurate.

5.2. Tipologie di frana

Nel complesso sono state individuate cinque diverse tipologie di frana: scivolamenti di detrito, colate di detrito, scivolamenti in roccia, scivolamenti in terra, colate in terra (Fig. 3).

Gli scivolamenti di detrito (*debris slides*, DS) costituiscono il 67% delle frane censite, risultando il tipo di dissesto più frequente innescato dall'evento. Si tratta di frane superficiali, con spessori generalmente inferiori a 1-2 m e aree minori di 1000 m², originate dallo scivolamento

dei terreni di alterazione che ricoprono la Formazione Marnoso-Arenacea. Queste frane si sono sviluppate prevalentemente su versanti ripidi e coperti da fitta vegetazione. Sebbene le radici e la copertura arborea forniscano un certo contributo di rinforzo meccanico e riducano in parte l'infiltrazione delle acque meteoriche, tali fattori non sono stati sufficienti a impedire il collasso.

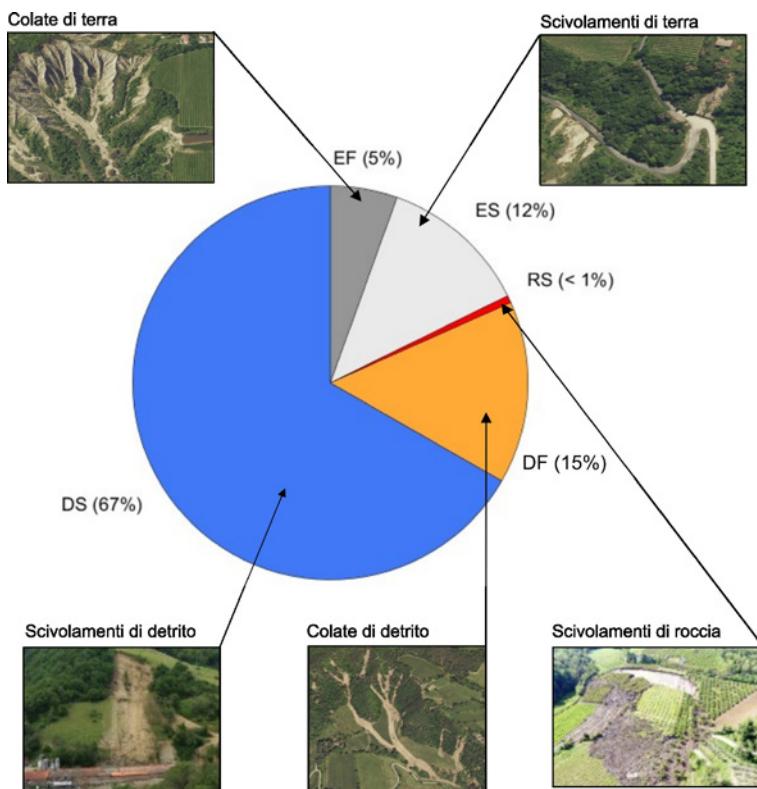


Fig. 3. Frequenza percentuale delle varie tipologie di frana innestate dall'evento di maggio 2023.

Le colate di detrito (*debris flows*, DF) costituiscono il secondo tipo di frana più frequente, rappresentando il 15% del totale. Rispetto agli scivolamenti di detrito, le DF presentano una mobilità decisamente maggiore: il materiale franato si è completamente fluidificato, propagandosi verso valle per distanze considerevoli. In tutti i casi osservati, l'innesto è riconducibile a uno scivolamento di detrito su un versante ripido, spesso boscato. Dopo l'innesto, le colate hanno in genere percorso i versanti senza seguire canali definiti, asportando la vegetazione e formando corpi allungati con morfologia sub-rettangolare.

Gli scivolamenti di roccia (*rock-block slides*, RS) costituiscono meno dell'1% del totale delle frane, ma sono stati quelli che hanno fatto la maggiore impressione nella popolazione. Queste frane si sono verificate su versanti isostrutturali all'interno della Formazione Marnoso-Arenacea, cioè su versanti la cui immersione è parallela a quella della stratificazione. Questo assetto geologico crea le condizioni di innesco per scivolamenti planari lungo i piani di strato. Lo spessore della massa rocciosa dislocata è variabile da circa 2 metri a oltre 30 metri, e diversi scivolamenti hanno interessato aree superiori a 10 ettari. Rispetto alle colate e agli scivolamenti

di detrito, gli scivolamenti di roccia si sono verificati su versanti dolci (tipicamente con pendenze inferiori a 15°) e hanno avuto dimensioni decisamente maggiori. Il grande volume, l'elevata velocità e il fatto che si siano verificati su pendii ampiamente urbanizzati e coltivati hanno reso questi fenomeni una delle principali criticità dell'evento.

Gli scivolamenti di terra (*earth slides*, ES) e le colate di terra (*earth flows*, EF) costituiscono rispettivamente il 12% e il 5% del numero totale di frane. Questi fenomeni si sono sviluppati principalmente all'interno di unità litologiche argillose, in particolare nelle argille plioceniche della catena esterna romagnola e nelle argilliti liguri presenti nell'area emiliana. In tali settori, il numero di frane è stato inferiore e i loro effetti meno rilevanti rispetto alle zone interne della Romagna, dominate dalla Formazione Marnoso-Arenacea. Come già osservato, i terreni argillosi hanno mostrato una risposta meno intensa alle piogge di maggio 2023 a causa della loro ridotta permeabilità e della durata relativamente breve delle precipitazioni. Inoltre, queste frane si sono concentrate soprattutto nelle aree calanchive, poco urbanizzate e già note alla popolazione locale per la loro instabilità.

5.3. Fattori predisponenti al dissesto

La carta delle frane consente di determinare i principali fattori geologici, geomorfologici e ambientali che hanno contribuito ai dissesti. Si tratta di un'analisi cruciale per pianificare gli interventi di ricostruzione, delimitare le aree potenzialmente soggette a frana in futuro e definire i vincoli di tutela del territorio.

L'identificazione dei fattori predisponenti si basa sull'incrocio tra la carta delle frane e altri livelli informativi, come la litologia del substrato, la pendenza dei versanti, la copertura vegetale e l'eventuale presenza di depositi di frana preesistenti. In letteratura sono disponibili diversi approcci per effettuare questa analisi in modo oggettivo e statisticamente robusto [6, 7], molti dei quali si fondano su un approccio bayesiano per stimare la relazione tra fattori e probabilità di frana.

L'approccio bayesiano consente di quantificare in modo esplicito il contributo di ciascun fattore predisponente, come una specifica litologia, una classe di pendenza o un tipo di uso del suolo, alla presenza delle frane combinando le informazioni a priori con quelle condizionate [14]. Per ogni classe di fattore viene calcolato quanto essa risulti associata alla presenza di frane, tramite un peso positivo W^+ , e quanto alla loro assenza, tramite un peso negativo W^- , rispetto alla distribuzione complessiva dei dissesti nell'area di studio. La differenza tra questi due valori, nota come indice di contrasto C rappresenta l'effetto netto della classe sul verificarsi delle frane: valori di $C > 0$ indicano una maggiore predisposizione rispetto alla media, valori di $C < 0$ una minore predisposizione, mentre valori di C prossimi a zero evidenziano l'assenza di una correlazione significativa con l'instabilità.

Questo approccio è utile per ridurre i nostri bias cognitivi, perché ci obbliga a seguire un ragionamento strutturato e basato su dati, evitando gli errori tipici del pensiero intuitivo. Nell'analisi delle cause delle frane è facile lasciarsi condizionare dall'esperienza personale o da esempi particolarmente evidenti: ad esempio, si potrebbe pensare che le frane avvengano soprattutto su pendii molto ripidi perché è più facile ricordare casi spettacolari, o che una certa litologia sia la più pericolosa perché si associa a un evento specifico che ci ha colpiti.

Un'analisi statisticamente rigorosa, invece, valuta per ciascun fattore con quale frequenza si verificano le frane, utilizzando i dati dell'inventario e la distribuzione delle diverse condizioni presenti nell'area di studio. In questo modo si confrontano le informazioni di partenza, come la frequenza totale delle frane, con le nuove evidenze che emergono dai dati. L'aggiornamento dei risultati segue regole matematiche precise, riducendo il rischio che l'interpretazione venga influenzata da opinioni o preconcetti personali.

Nel caso dell'evento di maggio 2023, l'analisi dei fattori predisponenti fornisce risposte chiare. La Fig. 4 mostra i valori dell'Indice di Contrasto C calcolato per le varie principali tipologie di frana e considerando diversi fattori di controllo. I risultati ottenuti mostrano che:

- I versanti più suscettibili a scivolamenti di detrito (DS) sono quelli costituiti da terreni di alterazione della F.ne Marnoso-Arenacea (litologia n.7 in fig. 4) e con inclinazione superiore a 25°; questi versanti sono tipicamente convessi, boscati e privi di evidenze di frane pregresse.
- Le colate detritiche (DF) si sono verificate in condizioni simili, come indicano i valori dell'Indice di Contrasto analoghi per tutti i fattori.
- Il principale fattore che ha influenzato gli scivolamenti di roccia (RS) è la litologia del substrato (F.ne Marnoso-Arenacea). Anche la presenza di versanti poco inclinati e di aree agricole mostra un'associazione positiva con questi fenomeni. Bisogna però sottolineare che questi ultimi non sono fattori causali diretti, ma piuttosto conseguenze della particolare morfologia dei versanti isostrutturali della Formazione Marnoso-Arenacea, che sono tipicamente poco acclivi e adatti alle pratiche agricole.
- Gli scivolamenti di terra (ES) e le colate di terra (EF) sono influenzati in larga misura dalle stesse condizioni, in particolare dalle forti pendenze (superiori a 20°) in aree con suoli a grana fine, spesso caratterizzate da vegetazione arbustiva o con scarsa o assente copertura vegetale. A differenza degli scivolamenti e delle colate di detrito, i movimenti franosi che si verificano in questi terreni fini mostrano una correlazione positiva con la presenza di frane preesistenti e tendono a interessare versanti esposti a sud-est, sud o sud-ovest.

Uno dei risultati più rilevanti dell'analisi è la debole correlazione tra le frane avvenute in Romagna (DS, DF, RS) e quelle già note in passato. Ciò indica che gran parte dei dissesti osservati sono frane di primo innesco, senza precedenti storici nell'area. In altre parole, molti dei fenomeni si sono sviluppati in zone considerate stabili, poiché le attuali normative tendono a classificare come a rischio soprattutto le aree con evidenze di frane pregresse. Questo aspetto rappresenta un punto cruciale: le carte di pericolosità disponibili si sono rivelate inadeguate, non avendo contemplato uno scenario di questo tipo. È probabilmente anche per questa ragione che l'evento ha avuto un impatto così rilevante e inatteso.

Quanto accaduto in Romagna non deve essere interpretato come un fallimento della pianificazione territoriale o degli enti preposti alla difesa del suolo. Sempre più spesso, infatti, eventi estremi come quello di maggio 2023 innescano risposte anomale del territorio, generando numerosi dissesti anche in aree che in passato erano considerate sicure. Il rapporto tra clima e territorio è fragile e in continua evoluzione, e deve essere tenuto in grande considerazione in ogni decisione di pianificazione. Forse la lezione più importante lasciata dall'evento di maggio

2023 è proprio questa: il contesto sta cambiando e occorre prenderne piena consapevolezza per progettare lo sviluppo delle aree montane con un'attenzione reale ai rischi presenti e futuri.

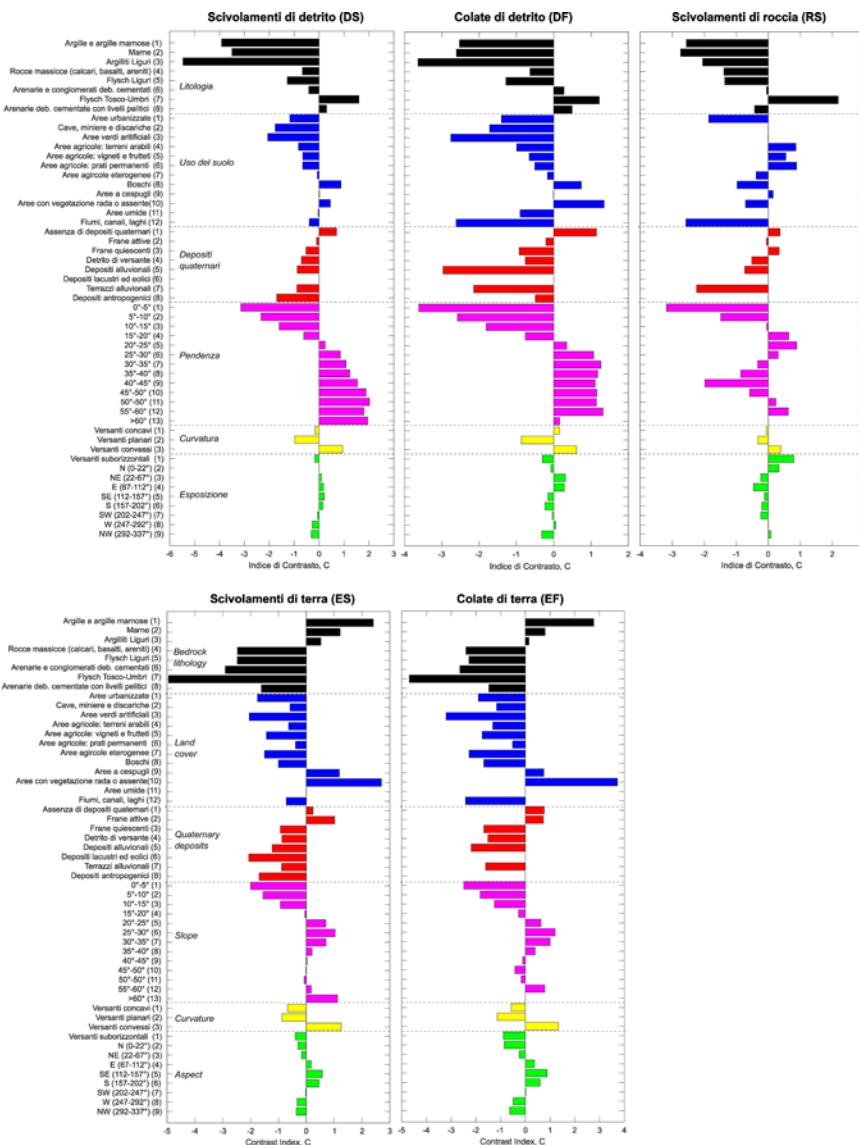


Fig. 4. Analisi dei fattori di controllo delle frane di maggio 2023. Ogni grafico mostra i valori dell'Indice di Contrasto C calcolato per diversi fattori predisponenti e per le diverse tipologie di frana.

6. Conclusioni

L'analisi dell'evento di maggio 2023 in Emilia-Romagna evidenzia con chiarezza quanto la gestione del rischio da frana sia complessa e caratterizzata da profonde incertezze. Le precipitazioni eccezionali di quei giorni hanno generato oltre 80.000 frane in un'area superiore a 1000 km², con conseguenze devastanti per le comunità locali. La fase di emergenza è stata

affrontata con rapidità ed efficienza, ma a più di due anni di distanza molte criticità restano irrisolte e la ricostruzione nelle aree montane procede con grande lentezza.

Le sfide da affrontare sono infatti enormi: in eventi di tale portata, le strutture tecniche preposte alla gestione del rischio idrogeologico risultano inevitabilmente sottodimensionate, rendendo difficile persino una ricognizione omogenea dei danni e la definizione di un elenco condiviso delle priorità di intervento. A ciò si aggiunge la complessità intrinseca dei fenomeni franosi, che ostacola l'individuazione di strategie comuni, tempestive ed efficaci su larga scala.

In contesti così complessi diventa indispensabile adottare un approccio scientifico rigoroso, basato su osservazioni sistematiche e analisi quantitative, per supportare decisioni informate e pianificare interventi realmente efficaci e sostenibili nel tempo. In particolare, l'esperienza di maggio 2023 ha evidenziato alcune priorità essenziali:

- potenziare le capacità di monitoraggio e raccolta dati, investendo in strumenti e risorse umane dedicate;
- aggiornare costantemente le carte di pericolosità, integrando le nuove conoscenze sugli effetti dei cambiamenti climatici;
- rafforzare la pianificazione territoriale, adottando strategie di mitigazione che tengano conto della crescente variabilità climatica;
- promuovere la consapevolezza del rischio nelle comunità locali, affinché la gestione dell'emergenza non ricada solo sulle istituzioni ma sia condivisa da cittadini e amministratori.

La lezione più importante lasciata da questo evento è forse che il contesto ambientale e climatico sta cambiando. Piogge estreme, un tempo eccezionali, stanno diventando più frequenti e possono generare dissesti anche in aree considerate sicure. Solo attraverso un approccio scientifico, sistematico e lungimirante sarà possibile ridurre la vulnerabilità del territorio e garantire una gestione del rischio realmente efficace, all'altezza delle sfide imposte dal clima che cambia.

Bibliografia

1. ISPRA. Dissesto idrogeologico in Italia: pericolosità e indicatori di rischio. 2021, Rapporto 356/2021, ISBN 978-88-448-1085-6, 232 pp.
2. Bianchi, C; Salvati, P. Rapporto Periodico sul Rischio posto alla Popolazione italiana da Frane e Inondazioni - Anno 2023. 2024, CNR-IRPI, DOI: 10.30437/report2023, 20 pp.
3. Gariano, S.L.; Rianna, G. How will the projected climate change influence rainfall-induced landslides in Europe? A review of modelling approaches. *Landslides*, 2025, 22, 1-17.
4. Duan, Y.; Ding, M.; He, Y.; Zheng, H.; Delgado-Téllez, R.; Sokratov, S.; Fuchs, S. Global projections of future landslide susceptibility under climate change. *Geoscience Frontiers*, 2025, 102074, 1-14.
5. Alcántara-Ayala, I. Landslides in a changing world. *Landslides*, 2025, 22, 1-15.
6. Van Westen, C.J.; Rengers, N.; Soeters, R. Use of geomorphological information in indirect landslide susceptibility assessment. *Natural hazards*, 2003, 30(3), 399-419.

7. Fell, R.; Corominas, J.; Bonnard, C.; Cascini, L.; Leroi, E.; Savage, W.Z. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. *Engineering Geology*, 2008, 102(3-4), 85-98.
8. Liu, S.; Wang, L.; Zhang, W.; He, Y.; Pijush, S. A comprehensive review of machine learning-based methods in landslide susceptibility mapping. *Geological Journal*, 2023, 58(6), 2283-2301.
9. Foraci, R.; Tesini, M.S.; Nanni, S.; Antolini, G.; Pavan, V. L'inquadramento meteo e idrologico degli eventi. *Ecoscienza*, 2023, XIV, 5, 20-24.
10. Brath, A.; Casagli, N.; Marani, M.; Mercogliano, P.; Motta, R. Rapporto della Commissione tecnico-scientifica istituita con deliberazione della Giunta Regionale n. 984/2023 e determinazione dirigenziale 14641/2023, al fine di analizzare gli eventi meteorologici estremi del mese di maggio 2023. 2023, *Technical Report Regione Emilia-Romagna*, 147 pp.
11. Folli, S. Il racconto dell'emergenza, *Ecoscienza*, 2023, XIV, 5, 6-11.
12. Kahneman, D.; Slovic, P.; Tversky, A. *Judgment under uncertainty: Heuristics and biases*. New York: Cambridge University Press, 1982.
13. Berti, M.; Pizziolo, M.; Scaroni, M.; Generali, M.; Critelli, V.; Mulas, M.; Tondo, M.; Lelli, F.; Fabbiani, C.; Ronchetti, F.; Ciccarese, G.; Dal Seno, N.; Ioriatti, E.; Rani, R.; Zuccarini, A.; Simonelli, T.; Corsini, A. RER2023: the landslide inventory dataset of the May 2023 Emilia-Romagna meteorological event. *Earth Syst. Sci. Data*, 2025, 17, 1055-1074.
14. Bonham-Carter, G.F. *Geographic Information Systems for Geoscientists, Modelling with GIS*. 1994, Oxford: Pergamon Press, ISBN 978-0-08-041867-4.

Gli atomi, il numero di Avogadro e il moto browniano: da Democrito ad Einstein e Perrin

Angelo Vulpiani

Dipartimento di Fisica, Università Sapienza, Roma e Istituto dei Sistemi Complessi, CNR, Roma

Contributo presentato da Pierluigi Contucci

Abstract

The atomic hypothesis has a long history which starts with Democritus and ends only at the beginning of the 19th century with the investigation of the Brownian motion which allowed us to understand the physical reality of atoms. Three scientists gave the main contribution to such a great feat: Albert Einstein with his seminal ideas on the use of the statistical mechanics for colloidal particles; Jean Baptiste Perrin who, with very smart experiments, verified the theoretical prediction of Einstein, and determined the value of the Avogadro number from the diffusion coefficient of the Brownian motion; Paul Langevin with the introduction of a clever mathematical approach. Brownian motion is not only an important historical and technical aspect of modern physics, but originated many developments. The Langevin equation is still one of the pillars for the study of nonequilibrium statistical mechanics, and it has been the starting point for the development of the mathematical theory of stochastic processes; moreover the Brownian motion has played a role in the recent progress in biophysics and finance.

Keywords

Atoms, Avogadro Number, Brownian Motion, Statistical Mechanics.

1. Introduzione

Oggi tutti sappiamo che esistono le molecole e gli atomi, ed il fatto che la materia sia costituita da questi minuscoli elementi, è ormai cosa considerata scontata, come la sfericità della Terra. Sicuramente non c'è rischio di sovrastimare la rilevanza degli atomi nella scienza, ecco come si esprimeva Feynman (Premio Nobel per la fisica nel 1965) riguardo l'ipotesi atomica:

Se in un cataclisma andasse distrutta tutta la conoscenza scientifica, e soltanto una frase potesse essere trasmessa alle generazioni successive, quale affermazione conterebbe la massima quantità di informazioni nel numero minimo di parole? Io credo che sarebbe l'ipotesi atomistica (o dato di fatto atomico, o comunque vogliamo chiamarlo) secondo cui tutte le cose sono fatte di atomi [...]. In questa singola frase c'è un'enorme quantità di informazione sul mondo che ci circonda, se soltanto ci si riflette sopra con un po' di immaginazione.

Gli atomi sono proprio tanti e questo ha conseguenze apparentemente incredibili, ad esempio noi ci scambiamo gli atomi. Anche Primo Levi (che era un chimico di professione) nel suo bellissimo libro *Il sistema periodico* parla di atomi e nel racconto dedicato al carbonio descrive i vari passaggi di un atomo:

Il numero di atomi è tanto grande che se ne troverebbe sempre uno la cui storia coincida con una qualsiasi storia inventata a capriccio. Potrei raccontare storie a non finire, di atomi di carbonio che si fanno colore o profumo nei fiori; di altri che, da alghe minute a piccoli crostacei, a pesci via via più grossi, ritornano anidride carbonica del mare, in un perpetuo girotondo...

Nonostante la loro grande rilevanza, fino a un secolo fa l'esistenza fisica reale degli atomi era un problema ancora controverso e persino alcuni importanti scienziati, ad esempio E. Mach, P. Duhem e W. Ostwald, non credevano che gli atomi fossero i costituenti fondamentali della realtà. Sorprendentemente anche Planck, uno dei padri della fisica moderna, cambiò opinione sull'esistenza fisica degli atomi solo alla fine del XIX secolo. Nel seguito una breve discussione su come si è arrivati a capire che gli atomi esistono.

2. Una breve storia dell'atomismo

L'idea atomistica ha una lunga storia (a partire dai filosofi greci) ma è stata accettata come verità scientifica solo all'inizio del XX secolo [1, 2, 3]. Tutto inizia nel V secolo a.C. con Leucippo e Democrito con la grande idea visionaria che il mondo sensibile sia descrivibile in termini di elementi (gli atomi) che racchiudono la vera essenza dei fenomeni. Naturalmente si può obiettare che gli atomi non si vedono, mentre noi sperimentiamo solo colori, forme, odori e così via; Democrito discute magistralmente il dilemma nel dialogo tra la ragione ed i sensi:

La Ragione: *Solo in apparenza una cosa è dolce o amara, solo in apparenza è calda o fredda, solo in apparenza ha un colore; in realtà esistono solo gli atomi e lo spazio vuoto;*

Rispondono i Sensi: *Povero intelletto! Tu che stai prendendo la tua evidenza da noi, stai cercando di spodestarci? La tua vittoria sarà la tua rovina!*

Dopo oltre due millenni possiamo dire che la ragione ha vinto: vedremo che anche se gli atomi non si vedono, si può dare un'evidenza sperimentale della loro esistenza e si possono contare.

Nell'antichità classica l'atomismo non ebbe grande successo e venne avversato dalle due grandi scuole filosofiche (la platonica e l'aristotelica), comunque ebbe seguaci come Epicuro e Lucrezio con il suo grande poema *De Rerum Natura*.

Nel Medioevo l'atomismo divenne sinonimo di ateismo e fu duramente contrastato dalla chiesa cattolica (principalmente per problemi con il dogma della transustanziazione nell'eucaristia).

Sia Galileo che Newton condividevano le idee principali emerse nell'antica Grecia secondo cui gli atomi costituiscono l'ultima natura della realtà materiale; Galileo non aveva una teoria precisa, mentre Newton pensava agli atomi in una prospettiva decisamente moderna

Non hanno le piccole particelle dei corpi certi poteri, virtù o forze, per cui agiscono a distanza, non solo sui raggi di luce per riflettere, rifrangere e inflettere, ma anche l'una sull'altra per produrre gran parte dei fenomeni della natura? (*Opticks, Book 3, Part 1*).

Tuttavia, l'impatto importante dell'atomismo per la scienza iniziò solo nel XVIII secolo, e la sua rilevanza aumentò nella seconda metà del XIX secolo. Prima dei tempi moderni, la parola "atomo" veniva usata con due diversi significati: ciò che i chimici chiamavano "atomo chimico", che in termini moderni corrisponde agli elementi chimici, e ciò che i fisici (e più in generale i filosofi naturali) indicavano come "atomo fisico", che ora corrisponde alle particelle indivisibili.

3. La meccanica statistica

Un primo tentativo moderno di riprendere l'idea atomistica per spiegare il mondo macroscopico lo si deve a Daniel Bernoulli che, nel 1738 nel suo libro *Hydrodynamica*, propose la teoria che descrive la materia come un insieme di tante particelle microscopiche (gli atomi) in movimento. Bernoulli riuscì a calcolare la pressione atmosferica assumendo l'aria costituita da un insieme di particelle e la pressione determinata dagli urti di queste particelle con le pareti. Era nata la meccanica statistica come programma per determinare le proprietà macroscopiche a partire dalla dinamica microscopica [3, 4].

Nella prima metà dell'Ottocento due ricercatori (J. Herapath e J.J. Waterston) proposero senza successo uno sviluppo delle idee di D. Bernoulli. Anni dopo Lord Rayleigh ritrovò negli archivi della Royal Society l'articolo di Waterston che era stato considerato una sciocchezza, e riconobbe il grande errore dei suoi predecessori che avevano provocato un ritardo di qualche decennio nello sviluppo della ricerca. Il primo risultato "ufficiale" fu quello di R. Clausius che riuscì ad imbastire una prima spiegazione del comportamento termodinamico dei gas in termini

di particelle che si muovono a grande velocità urtando tra loro e con le pareti del recipiente che le contiene.

Nel frattempo la termodinamica era andata avanti, si era sviluppata come scienza fenomenologica stabilendo le sue leggi fondamentali: *primo principio* l'energia si conserva; *secondo principio* l'entropia aumenta. Il progresso della termodinamica si intrecciò con il rapido sviluppo della tecnologia delle macchine a vapore, principale fattore trainante dell'industria dell'Ottocento.

Nel rapporto tra atomismo e termodinamica ci sono difficoltà sia tecniche che concettuali. Da una parte c'è una vecchia obiezione (che permarrà fino all'inizio del Novecento): gli atomi nessuno li ha mai visti, se esistono sono troppo piccoli, magari congetturare la loro esistenza può essere utile per facilitare i calcoli, ma solo come ipotesi di comodo e non come vera realtà fisica. Inoltre la termodinamica sembra in qualche modo in contrasto con la meccanica (che regola il movimento degli atomi). Come conciliare i comportamenti irreversibili del mondo termodinamico con quelli reversibili della dinamica degli atomi? La straordinaria costruzione della meccanica statistica vide impegnati soprattutto James Clerk Maxwell, Ludwig Boltzmann e Josiah W. Gibbs [1, 4, 5].

La controversia sull'atomismo era ancora aperta alla fine del XIX secolo: la maggioranza dei fisici britannici erano sostenitori dell'atomismo, mentre un altro approccio, l'energetica, era particolarmente popolare nella comunità scientifica tedesca, ed era sostenuto da importanti scienziati e filosofi, come P. Duhem, E. Mach e W. Ostwald. I teorici dell'energetica sostenevano che i fenomeni macroscopici dovessero essere trattati esclusivamente con un approccio fenomenologico basato sulla conservazione dell'energia e l'aumento spontaneo dell'entropia, e consideravano gli atomi solo come uno strumento matematico, magari utile ma senza alcun fondamento reale. A loro parere, poiché gli atomi e le molecole sono invisibili, una prova decisiva della struttura atomica era impossibile, quindi, la teoria atomica poteva essere considerata solo un'ipotesi fisicamente non verificabile e gli atomi come una mera nozione di convenienza pratica ma senza alcuna realtà fisica.

Il più strenuo nemico dell'energetica era Boltzmann, che ha dato il maggior contributo alla nascita della meccanica statistica [1,2,3,4,5]: i suoi confronti con gli oppositori della teoria atomica furono leggendari. Lo scontro più famoso, che per la sua durezza venne ricordato per decenni, ebbe luogo a settembre 1895 a Lubecca, al Congresso degli Scienziati Tedeschi. Anni dopo, il famoso fisico tedesco Sommerfeld descrisse ciò che accadde:

Helm era il campione dell'energetica; insieme a Ostwald, e dietro entrambi la filosofia di Mach (che non era presente all'evento). Nell'angolo opposto c'era Boltzmann, supportato da Felix Klein. La battaglia tra Boltzmann e Ostwald somigliava molto a un duello tra un toro ed uno smilzo torero. Tuttavia, in quella occasione il toro sconfisse il torero ad onta dell'agilità di quest'ultimo. I ragionamenti di Boltzmann risultarono convincenti. Noi, giovani matematici, eravamo tutti dalla parte di Boltzmann.

Ostwald accusa il colpo: in una lettera alla moglie racconta amareggiato lo scontro dal quale è uscito sconfitto, parla di “*compatto antagonismo*”, lamentandosi “*di essersi trovato per la pri-*

ma volta di fronte a un gruppo di persone così unanimemente avversari dichiarati”. Pur amici, Ostwald e Boltzmann continuarono la loro accesa e dura polemica con una serie di articoli. Nel 1909 Ostwald finalmente riconoscerà di avere avuto torto, Mach non cambiò mai idea. Particolarmente interessante è l’opinione di A. Einstein [6]

i pregiudizi di questi scienziati contro la teoria atomica possono essere indubbiamente attribuiti ai loro punti di vista filosofici positivisti. Questo è un esempio interessante di come i pregiudizi filosofici ostacolino una corretta interpretazione dei fatti anche da parte di scienziati con pensiero audace e sottile intuizione.

4. Il moto browniano

La conclusione della battaglia tra energetica ed atomismo fu possibile grazie allo studio di un fenomeno apparentemente marginale. Nel 1827, il botanico scozzese Robert Brown, studiando il meccanismo dell’impollinazione di una pianta australiana (*Clarkia pulchella*), scoprì un fenomeno, ora chiamato moto browniano (BM), che avrebbe giocato un ruolo importante in fisica, la scoperta venne pubblicata in un articolo con un titolo chilometrico [7]. Osservò al microscopio che un granulo di polline, un oggetto di pochi micron, piccolo a livello macroscopico, ma grande rispetto alle molecole d’acqua, sospeso in acqua mostra un movimento rapido e irregolare, che sembrava continuare per sempre.

All’inizio, i fisici considerarono tale fenomeno come una sorta di curiosità. Dopo alcuni decenni, tuttavia, fu compresa, o almeno intuita, l’importanza del moto browniano e la sua connessione con la termodinamica. Ad esempio, il fisico italiano Cantoni nel 1867 scrisse che il moto browniano è una “bella e diretta dimostrazione sperimentale dei principi fondamentali della teoria meccanica del calore” [8].

D’altro canto, è sorprendente che i fondatori della meccanica statistica e della teoria cinetica (Clausius, Maxwell, Boltzmann e Gibbs) non mostraronon alcun interesse per il BM.

Chi comprese appieno la rilevanza del moto browniano e capì come sfruttarlo – cioè cosa misurare – per dimostrare la struttura atomica della materia fu Albert Einstein che nel suo *annus mirabilis* (1905) propose una teoria rivoluzionaria [9]. Negli stessi anni, indipendentemente, anche Smoluchowski stava pensando al BM e pubblicò il suo lavoro poco dopo, nel 1906. Nel 1908, Langevin elaborò la teoria di Einstein in termini di equazioni differenziali stocastiche (utilizzando la terminologia moderna) introducendo l’approccio ormai universalmente usato nella meccanica statistica di non equilibrio [10]. Einstein era ovviamente a conoscenza della meccanica sviluppata da Maxwell, Boltzmann e Gibbs, pur accettando che i singoli atomi non potessero essere visibili, a causa delle loro dimensioni ridotte, fu il primo a capire che se la meccanica statistica era corretta allora qualsiasi particella piccola (ma di dimensioni finite, e visibile) immersa in un fluido dovrebbe comportarsi come una sorta di “grande” molecola (o atomo). Grazie alle collisioni con le molecole, dovrebbe acquisire un’energia cinetica media pari a $k_B T/2$ (dove k_B e T sono rispettivamente la costante di Boltzmann e la temperatura del fluido) per ogni grado di libertà che caratterizza il suo moto. Questo risultato è l’essenza della *equipartizione dell’energia*. Pertanto, per Einstein, il

moto incessante del granulo di polline non è altro che l'impronta dell'agitazione termica delle molecole del fluido.

L'altro ingrediente della teoria di Einstein è un risultato ben noto dell'idrodinamica, cioè la legge di Stokes: un corpo sferico di raggio a che si muove con velocità \mathbf{v} in un fluido di viscosità η è rallentato da una forza data da $-6\pi\eta a \mathbf{v}$.

Einstein usando l'equipartizione dell'energia e la legge di Stokes, mostrò che lo spostamento quadratico medio della particella, $\Delta\mathbf{x}(t) = |\mathbf{x}(t) - \mathbf{x}(0)|^2$ (dove $\mathbf{x}(t)$ denota la posizione della particella al tempo t), cresce linearmente nel tempo:

$$\langle |\Delta\mathbf{x}(t)|^2 \rangle \simeq 6Dt.$$

Per il coefficiente di diffusione D di una particella di raggio a in un fluido di viscosità η a temperatura T , vale la relazione di Einstein-Smoluchowski:

$$D = \frac{k_B T}{6\pi\eta a} = \frac{RT}{6N_A \pi\eta a}.$$

Nella precedente espressione appare la costante di Boltzmann k_B che è il rapporto tra la costante dei gas R e il numero di Avogadro N_A , il numero di atomi o molecole contenuti in una mole (cioè la massa in grammi di un composto chimico/elemento). Per completezza ricordiamo dalla termodinamica elementare dei gas ideali che, indicando con P , V , T ed n la pressione, il volume, la temperatura e il numero di moli di un gas, vale l'equazione di stato $PV = nRT$, che può essere ri-scritta come $PV = Nk_B T$, ove $N = nN_A$ è il numero totale di molecole/atomi nel gas. Il coefficiente di diffusione D rappresenta il tanto desiderato legame tra il mondo microscopico degli atomi, il numero di Avogadro N_A , e il mondo macroscopico; lo studio della particella colloidale, in particolare il suo spostamento quadratico medio ci permette di determinare il numero di Avogadro.

Nella sua biografia, Einstein espose chiaramente la sua motivazione per lo studio del moto browniano: "Il mio obiettivo principale era trovare fatti che garantissero l'esistenza degli atomi". Einstein menzionò il proprio stupore per il fatto che questo risultato non fosse stato ottenuto da Boltzmann: "È sconcertante che Boltzmann non abbia tratto egli stesso questa conseguenza così evidente, dal momento che Boltzmann aveva posto le basi per l'intero argomento" [6].

Possiamo dire che, con il moto browniano, gli atomi possono essere contati anche se non osservati direttamente. Dopo il lavoro teorico di Einstein (e Smoluchowski), il chimico Svedberg eseguì alcuni esperimenti sulla diffusione delle particelle colloidali, ma i suoi risultati non erano molto chiari e vennero interpretati erroneamente. Il contributo sperimentale conclusivo venne da Jean Baptiste Perrin con il suo studio sulla sedimentazione e la diffusione di minuscole particelle in acqua [11]. L'accordo tra teoria ed esperimenti valse a Perrin il Premio Nobel nel 1926 "Per il suo lavoro sulla struttura discontinua della materia e, in particolare, per la sua scoperta dell'equilibrio di sedimentazione".

Anche Seberg ottenne il premio Nobel, per la chimica, nel 1926. Il valore del numero di Avogadro N_A misurato da Perrin fu successivamente confermato da altre misure non connesse con la teoria cinetica. Rayleigh ipotizzò che il colore blu del cielo sia dovuto alla dispersione

della luce solare con le molecole di gas presenti nell'atmosfera, piuttosto che particelle sospese (come gocce d'acqua). Il meccanismo proposto da Rayleigh, ora chiamato scattering di Rayleigh, che è responsabile del blu del cielo, comporta la dispersione della luce con particelle più piccole della lunghezza d'onda della luce. In un modo piuttosto simile al caso del moto browniano, la teoria della dispersione di Rayleigh permette di stabilire una relazione tra il numero di Avogadro e le quantità che possono essere misurate in esperimenti ottici: il valore del numero di Avogadro ottenuto con tale approccio è in buon accordo con quello trovato negli esperimenti di Perrin sulla diffusione delle particelle browniane.

La determinazione del numero di Avogadro, N_A , dal coefficiente di diffusione, D , e l'accordo con il valore ottenuto da misure indipendenti chiusero definitivamente la controversia accesa sull'esistenza degli atomi tra Boltzmann e i principali esponenti dell'energetica, Mach e Ostwald, che consideravano gli atomi utili ma non reali per una descrizione coerente della natura.

In una conferenza a Parigi, nel 1911, Arrhenius, riassumendo i lavori di Einstein e Perrin, dichiarò

Dopo questo, non sembra possibile dubitare che la teoria molecolare sostenuta dai filosofi dell'antichità, Leucippo e Democrito, abbia raggiunto la verità almeno negli elementi essenziali.

Gli atomi potevano essere contati.

5. L'eredità del moto browniano

Il moto browniano non costituisce solo un importante aspetto storico e concettuale della fisica moderna, ma è anche il punto di partenza per lo sviluppo della teoria matematica dei processi stocastici, così come per i recenti progressi in fisica, biofisica e finanza.

Pochi anni dopo l'articolo di Einstein, Langevin fu in grado di ottenere i risultati in modo semplice ed elegante introducendo il primo esempio di equazione differenziale stocastica. Partendo dall'equazione fondamentale della meccanica $F = ma$, Langevin divise la forza in due contributi uno sistematico (medio) dovuto all'attrito tra la particella colloidale e il fluido (la legge di Stokes) e uno casuale dato dalle collisioni delle molecole (veloci) del liquido con la particella colloidale. L'equazione di Langevin fu il primo esempio non banale di processo stocastico. Tale branca della matematica, ora ampiamente utilizzata in fisica, chimica, biologia e scienze applicate, fu sviluppata in modo sistematico negli anni Trenta principalmente da Kolmogorov con la formalizzazione delle equazioni di Fokker-Planck e delle Master equation per i processi di Markov a tempo continuo. Un altro lavoro pionieristico, che partì dalla descrizione matematica del moto browniano, è dovuto a Wiener, che introdusse l'idea dell'integrale sui cammini, alla base della formulazione della meccanica quantistica di Feynman.

Per apprezzare ulteriormente la vasta portata del moto browniano alla scienza, vale la pena notare che, nonostante le loro origini completamente diverse, il moto browniano e la valutazione delle opzioni in finanza possono essere descritte con un unico formalismo matematico.

Pochi anni prima dell'articolo di Einstein, il matematico francese Louis Bachelier, nella sua tesi di dottorato *Teoria della Speculazione* (1900), propose un'equazione per il comportamento dei prezzi delle azioni che è essenzialmente la stessa di quella che descrive una particella che compie un moto browniano. Negli anni successivi fino ad oggi, i processi stocastici, in particolare le equazioni differenziali stocastiche, hanno ricevuto grande attenzione dalla comunità finanziaria e dai broker. Ad esempio, la celebre teoria di Black e Scholes per la valutazione delle opzioni è dal punto di vista matematico, nient'altro che un'applicazione dell'equazione di Langevin [12]. Questi profondi legami hanno portato, negli ultimi decenni, migliaia di persone con un dottorato in fisica o matematica a trovare un lavoro, anche di alto livello, nelle banche e nelle aziende finanziarie.

Ed ora per concludere qualche parola sui tempi attuali. Oggi le tecnologie permettono agli scienziati di studiare le fluttuazioni termiche in piccoli sistemi come le sospensioni colloidali. Tale possibilità è molto importante nelle nano scienze. Inoltre, le fluttuazioni giocano un ruolo cruciale nei meccanismi di trasporto assistiti dal rumore, chiamati anche motori browniani. In conclusione, possiamo affermare che il lavoro di Einstein sul moto browniano, che talvolta è stato considerato il meno rilevante tra quelli dell'*annus mirabilis*, con il suo impatto sulla fisica delle particelle colloidali, e altre forme di materia soffice (ad esempio i granulari) e dei sistemi biofisici, ha avuto la sua rivincita nel mondo subatomico [13, 14, 15, 16].

Bibliografia

1. Cercignani, C. *Ludwig Boltzmann: the man who trusted atoms*; Oxford University Press: Oxford, 1998.
2. Lindley, D. *L'atomo di Boltzmann*; Bollati Boringhieri: Torino, 2002.
3. Falcioni, M., Vulpiani, A. Ludwig Boltzmann: un tributo per i suoi 170 anni; *Lettera Matematica*, 2014, 91, 16-26.
4. Gallavotti, G. *Statistical mechanics. A short treatise*; Springer-Verlag: Berlin, 1995.
5. Boltzmann, L. *Modelli matematici, fisica e filosofia*; Bollati Boringhieri: Torino, 1999.
6. Pais, A. *Sottile è il Signore. La scienza e la vita di Albert Einstein*; Bollati Boringhieri: Torino, 2012.
7. Brown, R. A brief account of microscopical observations made in the months of June, July, and August, 1827 on the particles contained in the pollen of plants; and on the general existence of active molecules in organic and inorganic bodies, *Philos. Mag.*, 1827, 4, 161-173.
8. Cantoni, G. Su alcune condizioni fisiche dell'affinità e sul moto Browniano; *Il Nuovo Cimento*, 1867, 27, 156-167.
9. Einstein, A. Über die von der molekularkinetischen theorie der wärme geforderte bewegung von in ruhenden üüssigkeiten suspendierten teilchen; *Ann. Phys. (Leipzig)*, 1905, 4, 549-560; la traduzione in inglese nel libro *Investigations on the Theory of the Brownian Movement*; Dover Publications: Mineola (NY), 1956.
10. Langevin, P. Sur la théorie du mouvement Brownien; *Compt. Rend. Acad. Sci.*, 1908, 146, 530-533; la traduzione in inglese, On the Theory of Brownian Motion, *Am. J. Phys.*, 1997, 65, 1079-1081.

11. Perrin, J. *Gli Atomi*; Editori Riuniti: Milano, 2014.
12. Bouchaud, J.P.; Potters, M. *Theory of financial risk and derivative pricing: from statistical physics to risk management*; Cambridge University Press: Cambridge, 2003.
13. Haw, M. *Nel mondo di mezzo. Il moto browniano tra materia e vita*; Zanichelli: Bologna, 2008.
14. Sekimoto, K. *Stochastic Energetics*; Springer-Verlag: Heidelberg, 2010.
15. Piazza, R. *La materia dei sogni: Sbirciatina su un mondo di cose soffici*; Springer Italia: Milano, 2010.
16. Sarracino, A.; Puglisi, A.; Vulpiani, A. *Nonequilibrium Statistical Mechanics: basic concepts, models and applications*; IOP Publishing: Bristol, 2025.

The fear of AI: A simple story of complexity

Marco Rocetti

Department of Computer Science and Engineering, Alma Mater Studiorum - University of Bologna, Resident Corresponding Academician

Abstract

This brief essay reflects on the fears that humans express toward the latest generation of AI, arguing that these fears plausibly originate from the fact that current AI possesses many characteristics that assimilate it to complex systems, as defined in modern systems theory. The features of unpredictability, emergent behavior, and self-organization, that typically characterize complex systems, do not reassure humans who usually expect predictability and determinism from the systems they are entrusted with. The essay suggests that part of the complex nature of modern AI lies in the very algorithm used for learning from data, which, in the process of training these systems, highlights and amplifies the aforementioned characteristics. The essay concludes by offering a final reflection on the fear that stems from the uncertainty inherent in science as a whole, not just from the latest generation of AI.

Keywords

Symbolic and sub-symbolic AI, Concerns about AI, Complexity, Systems theory, Gradient descent, Uncertainty.

1. Introduction

As I begin to write this brief essay, I am struck by all the possible questions that my colleagues and I may face during our meeting at the Bologna Academy of Sciences, which is specifically dedicated to modern AI and its impact on society. In the end, it does not take much imagination because the questions, though many and phrased in different ways, all point to one major issue. This can be summed up by the question of whether modern AI will eventually replace humans, and if so, in which activities first, and, most importantly, with what implications and impact on humans and human society [1].

To begin answering from the end, I will state right away that I believe that a profound sense of fear is behind all these questions. I also argue that this fear is rational, as I will try to show in the rest of this essay. To get straight to the point, my conjecture is that this is a specific feeling of fear that humanity reserves for anything that we are used to calling complex [2]. I will return later to what I mean by this term, which, by the way, can be easily ascribed to the definition given in the context of systems theory, yet my conviction is that such a feeling is not irrational, as I have said before, because it is not so much directed at the system itself, as it is at its consequences and the presumed inability of humans to fully control and, above all, understand it.

I will proceed within this Introduction by immediately highlighting why any system, technically definable as complex, can generate fear. The reasons are essentially the following:

a) *Will we lose control?* Complex systems are characterized by multiple interconnected components that interact in non-linear and often unpredictable ways. This interconnectedness makes it nearly impossible to predict the outcome of an action with certainty. Consider the well-known issue of global climate: a small change in one region can have cascading effects almost worldwide. The feeling of losing control over what is happening is one of the deepest sources of fear.

b) *Are they predictable or not?* Complexity intrinsically leads to uncertainty. We cannot be sure of the consequences that will stem from events triggered within a context of complexity. This is true both at an individual level, for example when choosing a career in a rapidly evolving job market, and at a global level, such as in the management of pandemics or economic crises. Unpredictability makes planning difficult and can make us feel vulnerable.

c) *Can cascading consequences be triggered?* In complex systems, a small problem in one component can trigger a series of chain failures that lead to the collapse of the entire system. The crash of a financial market or a large-scale power blackout are striking examples. This kind of hidden fragility is particularly frightening because disaster can seem to come *out of nowhere*.

d) *How much do we understand about how they work?* Complexity can exceed our cognitive abilities. It is difficult for the human mind to process an enormous amount of data and interconnections simultaneously. We often rely on simplified mental models to understand reality, but these models fail to capture the true nature of complex systems, leading us to make wrong choices. The feeling of not understanding what is happening can generate frustration and anxiety.

In addition, the ethical dilemmas they pose should also be considered, due to their ambivalent nature (for example, who is responsible in a context where the interactions between inter-subjective entities are so intricate?). The answers to the questions above explain why humans

fear *complexity* and the systems it defines. It is a reaction to the fact that these systems challenge our perception of control, predictability, and understanding of the world. Nevertheless, and I will dedicate the last part of the essay to this, it is also true that humanity has always sought to tame complexity through science, technology, and new forms of organization, demonstrating that, alongside fear, there is also a strong desire for understanding and adaptation.

In closing this Introduction, I preview here what I will cover in the next sections. In the next one, I will give a concise definition of what complex systems are. In the third section I will argue why AI, especially this latest generation, also known as sub-symbolic AI, can rightly be classified as such, certainly much more so than the symbolic AI that preceded it. In the fourth section, I will try to illustrate the origin of this complexity. Unlike explanations provided in other articles by other colleagues, explanations that are certainly more learned than the present one, I will show how this origin is partly to be found in the algorithmic domain. Particularly, in the algorithm with which sub-symbolic AI systems that learn from data learn from the data itself. Not surprisingly, it has, relatively ancient roots in the method which was developed and published in 1847 by the French mathematician Augustin-Louis Cauchy, in an attempt to solve the problem of determining the orbit of a celestial body based on its equations of motion [3]. Finally, I will conclude by stating my doubt that everyone who fears this latest version of AI, even for valid reasons, has ever truly considered the real context (both scientific and otherwise) in which AI operates. I will argue that the implications of their fear could change based on the answer to that question.

2. Defining a complex system

The theory of complexity, or the theory of complex systems, is a branch of modern science that has established itself in recent decades. It was driven by the rise of computerization and a growing inclination to abandon the assumptions of linearity in dynamic systems to investigate their real behavior more deeply. The concept of complexity has its roots in the late 19th-century works of the physicist-mathematician Henri Poincaré and in the contributions of many mathematicians and physicists, such as Kolmogorov and Schrödinger, just to cite a few, from the first half of the 20th century [4, 5].

Decisively, the advent of computers came alongside these contributions, leading Edward Lorenz to confirm Poincaré's intuition. He did this by experimentally demonstrating how significant (finite) variations in a dynamic system can arise from infinitesimal variations in initial conditions [6,7]. Leaving aside for reasons of space the numerous, highly important contributions of mathematicians and physicists to the structuring of the concept of complexity, one cannot, however, forget to mention how, on the strength of these scientific results, the philosopher Edgar Morin proposed a monumental rationalization and generalization of the concept of *complexity*. Essentially, he moved it from systems to the very notion of thought, complex thought. While acknowledging its relevance, I find it hard not to notice, however, how due to narrative suggestions, the use of the term *complexity*, once it left the scientific context, has become *unstable, questionable* and very often employed in a way that is semantically far from the definition that generated it.

It is now worthwhile to approach the definition of a complex system, and to do so, one must start from the almost opposite concept of *linearity*, always in the sense attributed to these concepts by systems theory. In general, a problem is said to be linear if it can be broken down into a set of independent sub-problems. When, on the other hand, the various components of a problem interact with each other in such a way that it becomes impossible to separate them to solve the problem sub-problem by sub-problem, then we speak of non-linearity.

More specifically, a system is linear if it responds in a way that is directly proportional to the stimuli it receives. It is then said that for that system, the principle of superposition holds, in the sense that if to a first stimulus the system gives a certain response, and to a second stimulus it gives another response, then stimulating the system with both stimuli simultaneously will lead it to respond with a linear combination of the two previous single responses.

Although the problems that arise in nature are often non-linear, humanity has become accustomed to resorting to the hypothesis of linearity to achieve simplified solutions, even when the system is not linear. This leads to describing the problem mathematically with models that treat it as if it were linear, considering the effects of non-linearity to be negligible, in a first approximation.

Mathematically speaking, the coefficients of the corresponding polynomial function are treated as if they were independent of each other (or so weakly dependent that their interactions can be ignored).

Pretending linearity where there is none is useful. It provides simple, easily calculable solutions that are in turn easily extendable to other similar problems, and this fiction has undoubtedly led to enormous scientific and technological progress for humanity. The fact, however, is that our claim to linearize every phenomenon (natural or not) can often prove simplistic and therefore inadequate to describe that phenomenon and thus to adequately solve the problems it entails.

When we stop pretending that systems are linear and study them in their complexity, we often find ourselves dealing with systems composed of various interconnected components or sub-systems that can interact with each other (including through feedback loops). Therefore, it is no longer possible to analytically solve all the components and their interactions, and we need *holistic* approaches capable of computing the behaviors of the individual sub-systems together with their mutual interactions, *in toto*. The drawback of this is that it becomes necessary to rely on simulations or heuristics, which lead to partial or approximate solutions.

But this in itself would not be a serious problem. Even more crucial of complex systems is their intrinsic tendency towards so-called *emergent behaviors* and related *self-organization*. This means a complex system can produce a behavior that is unpredictable and cannot be derived from the simple sum of its component elements (for example, consider the unpredictably volatile trends of the financial markets). Just as unpredictable behaviors can emerge from the non-linear interactions between a system's components, these systems can also exhibit an unpredictable capacity for self-re-organization among their many non-linearly interacting parts. This, in turn, gives rise to global behaviors that cannot be explained by a single physical law (unlike in linear systems). Famous examples of these include communities of interacting people, vehicular traffic, and computer networks.

In closing, we are dealing with unstable aggregates of agents and connections that self-organize to ensure their adaptation and survival. Usually, these attitudes emerge coherently over time, adapting and organizing the system as a whole, without a specific entity deliberately designed to manage or control it, but simply through the constant redefinition of the relationship between the system itself and the environment in which it is immersed.

Ultimately, what bothers us humans about these systems is that from the simple non-linearity of the interaction between their components and their relative self-organization, a collective tendency arises to exhibit properties that are inexplicable based on the laws governing the individual components alone. If this has already worried the reader and made them understand in advance why current AI causes concern in some, I will not burden the discussion by dwelling on other possible implications of complex systems such as so-called chaotic behaviors, the theory of bifurcations and catastrophes, and so on [2].

3. The complexity of symbolic and sub-symbolic AI

To recap from the previous section, a complex system does not adhere to the principles of homogeneity and superposition. Its distinctive properties are: a) Emergent behavior: its behavior of the system as a whole is more than the sum of its parts. For example, the behavior of a flock of birds cannot be deduced by studying the flight of a single bird. The collective organization and formations that are created are properties that emerge only from the interaction of all the birds. b) Non-linearity: small variations in inputs or initial conditions can produce enormously different and unpredictable outcomes over time (often referred, after Lorenz, to as the *butterfly effect*). c) Self-organization: the system has the capacity to structure and organize itself autonomously in response to internal and external stimuli, without the need for an external, centralized control. In short, a complex system is characterized by non-linear interactions, emergence, and self-organization, which make it unpredictable and dynamic.

We now need to argue why and under what conditions AI can be considered a complex system, a trait that becomes more pronounced with new-generation AI. Let us start, then, with the so-called symbolic AI, by first trying to provide an intuitive definition of it, one that is easily comprehensible even in the operational procedures it implements. In summary, symbolic AI has been the first major approach to artificial intelligence [8]. It is based on the idea that intelligence can be replicated by manipulating symbols and applying logical rules, in a way similar to how the human mind was believed to work. The goal was to make the computer reason, not to have it learn from data. Hence, the functioning of symbolic AI is based on two main elements. *Symbols*: these are abstract representations of real-world concepts. Things like dog, cat, barks, has-four-legs or mammal are all symbols. *Logical Rules*: these are explicit, predefined instructions that link the symbols together. These rules are usually expressed in an IF... THEN... format.

Imagine we want to build a symbolic AI that identifies a dog. As the programmer, we should enter the following rules into the corresponding knowledge base: *Rule 1*: IF the animal has-four-legs AND barks, THEN the animal is a dog; *Rule 2*: IF the animal is a dog, THEN it is a mammal.

When the system is given the input: animal that has four legs and barks, the AI examines its knowledge base, applies Rule 1, and concludes that it is a dog. It can then apply Rule 2 and make a further inference: the animal is a mammal. This simple example illustrates the notable fact that, with symbolic AI, the decision-making process is completely transparent and explainable because one can always trace back to the rule that led to that conclusion. Its power lies in its ability to make logical deductions from a set of explicitly defined symbols and rules.

Unlike the simplicity of the example, things can also get complicated, for instance, because the knowledge base can become very large, or because, instead of the classical *modus ponens*, more complex logical rules could be adopted that complicate the inferential process. But above all, this happens because symbolic AI systems are typically used through backward chaining, which means interrogating the system to judge the veracity of a fact, thus triggering decision-making processes that start from what one wants to prove and work their way back up the decisional tree until the fact is proved (or negated). Finally, the fact that probabilistic weights can be linked to rules does not fundamentally change this approach; on the contrary, it complicates the semantic interpretation. This is because probability theory has its own formal structure, which already provides for the possibility of updating beliefs based on Bayes' theorem. As a result, update mechanisms based on the formula for conditional probability are often not easily compatible with the admittedly simpler ones that stem from inference rules like *modus ponens* or *tollens* [9].

Now, I will not spend too much time on the definition of non-symbolic AI, both for reasons of space and due to the wide range of important differences between its various instances, which would lead us too far afield. For explanatory purposes, it is enough to state that sub-symbolic AI is a field of artificial intelligence that focuses on systems that learn from data and process information without relying on explicit symbolic representations or rules, unlike traditional AI. Instead, it uses numerical values and complex mathematical models to represent knowledge, an approach inspired by how the human brain processes information through interconnected networks of neurons. A key example of this is deep learning, which uses neural networks made up of many layers. These networks learn by being trained on vast amounts of data, such as images, text, or audio. During training, the network adjusts the numerical weights and biases of its connections. When an output is incorrect, the network uses a process called *backpropagation* to adjust these weights to reduce the error. Over many iterations, the network learns to recognize patterns and make accurate predictions [10].

For instance, to teach a sub-symbolic AI to identify cats, one should feed it thousands of labeled images. The network would initially make random guesses, but through backpropagation, it would gradually learn which combinations of weights and biases lead to correct identifications. Consequently, the knowledge it gains is not a set of rules like *a cat has pointy ears*, but rather a complex configuration of numerical weights that allows it to successfully identify a cat. This approach has been proven incredibly effective for tasks like image recognition, natural language processing and speech understanding, for example.

But having briefly described both, let us now get to the point we wanted to make: namely, when we talk about symbolic or sub-symbolic AI, are we talking about entities that meet the requirements of complex systems? In my opinion, the answer is yes, even though, and this

is perhaps the turning point of this whole situation, it is in a much more pronounced way for sub-symbolic AI.

In particular, regarding symbolic AI, one could argue that symbolic AI is complex because it is not linear, where its complexity emerges from:

- *Vastness*: its complexity is primarily *combinatorial*. A symbolic system can have an enormous number of rules and a logical search tree with billions of branches. Its complexity lies in managing this immense network of possibilities.
- *Complex internal structure*: with symbolic AI, there is no true learning or adaptation in the biological sense of the term. The rules and symbols are explicitly entered by a human. In this sense, the system's behavior would be, therefore, in principle, predictable because all the rules are known, however in the practical use of these systems it is not always easy to trace their lines of reasoning, a fact Gary Kasparov learned firsthand way back in 1997 in New York City.

When it comes to sub-symbolic AI, things are decidedly worse (or better, depending on how one looks at it), because sub-symbolic AI is to be considered *more complex*. Its complexity is not just combinatorial, but also emergent. Its systems are not governed by explicit rules, but instead learn to create their own internal representations of the data, thus revealing the following characteristics.

- *Emergence*: the intelligence and ability of the system to recognize a cat or translate a text are not the result of a coded rule, but of emergent behaviors that arise from billions of interactions between the network's neurons during training. This is a key trait of complex systems.
- *Adaptation*: the system autonomously adapts and self-organizes. The learning process, in which the weights of the neural connections are modified to minimize an error, is a form of dynamic adaptation to new inputs, a key characteristic of complex adaptive systems.
- *Intrinsic non-linearity*: unlike linear systems, neural networks are intrinsically non-linear thanks to their activation functions and layered structure. This non-linearity is not a simple sum of rules, but a complex transformation that generates unpredictable behavior.

In summary, we can conclude that symbolic AI is complex because it is non-linear and requires managing a vast amount of logical information. However, its complexity is stable and determined by the rules that govern it. Sub-symbolic AI, on the other hand, should be considered vastly more complex because its intelligence emerges, learns, and adapts somewhat autonomously, creating a behavior that cannot be predicted *a priori* from simply knowing the code or the data it learns from.

4. To the sources of the complexity of sub-symbolic AI

In 1986, a seminal paper in *Nature*, co-authored by Geoffrey Hinton, David Rumelhart, and Ronald J. Williams, popularized the *backpropagation* algorithm [11]. This was a critical step in training multi-layer neural networks, even though the group was not the first to develop the method. Backpropagation (or error backpropagation) is really a fundamental method used to train neural networks: in simple terms, it is an algorithm that efficiently calculates the gradient,

which is the direction and magnitude by which the network's parameters (the weights) must be changed to minimize the error committed by the system. Its operation is based on a clever application of the chain rule. Essentially, it unfolds in two main phases: a) A *forward* step where the system receives an input and processes it, layer by layer, until it produces an output. This output is then compared with the expected result to calculate the error. b) A *backward* step where backpropagation comes into play. Instead of performing redundant calculations, the algorithm starts from the last layer and moves backward. At each layer, it calculates how much each weight contributed to the total error and determines how to adjust it. In fact, the term backpropagation strictly refers only to this gradient calculation phase, but it is often more generally used to denote the entire learning process. Once the gradient is calculated, the network/system uses a method like *gradient descent* to update the weights in the direction that reduces the error.

Underpinning all of this is indeed this mentioned concept of *gradient descent*, a fundamental method for unconstrained mathematical optimization, generally attributed to the French mathematician Augustin-Louis Cauchy, who first suggested the approach in 1847. This is an iterative procedure designed to minimize a differentiable multivariate function. The core idea is to repeatedly take small steps in the opposite direction of the function's gradient at the current point. This works because the gradient points in the direction of the steepest increase, so moving in the opposite direction is the fastest way to descend to the function's minimum. Conversely, stepping in the direction of the gradient will lead to a maximum, a process known, in turn, as *gradient ascent*. This method is particularly useful in machine/deep learning for minimizing the cost or loss function.

Therefore, this method is used to train neural networks on data because, under certain conditions (*i.e.*, differentiability and convexity), it guarantees the minimization of the loss function. It is also true that in most real-world training scenarios, the loss functions turn out to be non-convex. Therefore, the iterative process of calculating the gradient and moving in the opposite direction leads to finding only local minima. This is also why much of modern deep-learning research is dedicated to developing more sophisticated optimizers that can navigate these non-convex landscapes and, hopefully, find a global minimum (or at least a very good local minimum). Ultimately, this process progressively reduces the error and enables the network to recognize what it is observing, or, more precisely, what humans are showing it with near-perfect accuracy.

In closing this section, far from considering the gradient descent algorithm itself intrinsically complex, as it is the very mechanism that allows much of sub-symbolic AI to function, it is nevertheless a key component that contributes to the overall complexity of a neural network's learning process, being the main tool that allows this system to evolve.

Here is how I argue that gradient descent contributes to this complexity, alongside a variety of other factors, like the number of layers and the trainable parameters of a given neural network:

- *Feedback*: the algorithm uses a continuous feedback loop. The network's output is compared to the expected value (the error), and this error is used to adjust the weights. This non-linear feedback loop is a hallmark of complex systems because the action (weight update) directly depends on the outcome (error), influencing future actions in unpredictable ways.

- *Dynamic behavior*: a neural network learning process is itself a dynamic system. The system's trajectory, that is the evolution of weights over time, is guided by gradient descent. This path is not predetermined; it is an iterative movement in a high-dimensional space (the weight space) that seeks to minimize the cost/loss function.
- *Emergent properties*: when applied to a neural network, gradient descent allows for the emergence of unexpected properties. The network does not learn explicit rules (like if-then-else statements) but instead develops an internal representation of reality, such as the ability to recognize faces or understand languages. This ability is not programmed; it emerges from the dynamic interactions of the nodes, guided by the gradient descent.

In summary, gradient descent is the engine that allows a neural network, a complex system, to self-organize. Its main function is to guide the system's evolution toward a state of minimum error. The complexity of the learning process lies in the fact that, even though the algorithm is simple in its logic, its cumulative effect on thousands or millions of weights leads to emergent and sometimes unpredictable behaviors.

5. Concluding remarks

The idea developed in this concluding section is not to provide the usual summary of what has already been discussed in the previous ones, but to use this space and time to propose a further point for reflection. This reflection aims to offer at least one soothing, or consoling, argument to those who fear AI, and with good reason based on what was discussed earlier. This argument is loosely based on a recently published essay that discusses the concept of *truth* and how *science* has contributed to its determination [12].

Simplifying as much as possible, it is assumed that there are (at least) two ways to handle the concept of *truth* in science, and the manner with which it is confirmed through proper verification.

The first context is that of mathematical truth, which since the time of Euclid has proposed a point of view entirely governed by the duality of axioms and theorems. The axioms are the premises, accepted as true without any discussion. Theorems, instead, are knowledge logically derivable from the axioms. From this perspective, the solutions that humanity has found for real-world problems with mathematical thinking are simply constructive procedures that advance infallibly, but only by starting from premises we have held to be true, along with the rules that have helped us in the construction. But what if such premises were not true? And what if the very rules of inference we have relied on were to prove, at some point, to be inadequate in capturing the reality that surrounds us? For example, who says that if it rains, our heads will always be wet, even when we wear a waterproof hat or open an umbrella?

Let us, now, move on to the second context, the one, all in all, more recent, in which humanity has become accustomed to deriving that kind of knowledge on the basis of which modern society developed. This is the typical context of natural and physical sciences, those that require the sophisticated step of experimentation to validate a theory (*i.e.*, a true fact). In this second context, all the truths we arrive at are, in themselves, contingent and empirical. Each one is demonstrated, yet always with a margin of doubt, and thus of risk, which, however, we

consider bearable. Their coherence with the real world is always dependent on the amount of evidence (or proofs) we have managed to gather during the experimentation phase. Unlike the mathematical context, here there is not even a need to rhetorically advance the *what if* doubt, because these truths are precisely built with *doubts inside*. This is so indisputable that it often happens that in extreme crisis situations we tend to forget the limits, and at the same time the true strength, of truths acquired through the technique of validation by experimentation. If the reader is not convinced by what has just been said, a worthwhile effort would be to think back to the recent COVID-19 pandemic and to consider both hydroxychloroquine and mRNA vaccines [12]. One should try to ask themselves if they remember which of the two methods emerged as scientifically valid in the sense mentioned before. But above all, one might try to ask if, in those moments or even afterward, personal beliefs aligned with the messages that science was providing, and whether those messages were found to be comforting or, instead, misleading.

In closing, this entire final digression would like to present the reader with the following, hopefully comforting, consideration. What we call science (and we have actually only been calling it that since a relatively short time) has generally brought great advantages to humanity, but it has always had to confront uncertainty, unpredictability, the emergence of unexpected phenomena, and problems that have emerged as side effects of solutions to other problems. This has been true whether it occurred under the apparently infallible guise of logical-mathematical reasoning or in the form of an incessant and continuous experiential effort to find evidence for or against a given scientific theory.

So my final question to readers is why worry, beyond the limits of what has been explained to be rational, about the artificial (intelligence)? After all, the artificial is human, just as the human has so much of the artificial within it. Uncertainty and unpredictability are both outside of us, and also inside of us. To fear artificial intelligence is perhaps just one of the many ways we feel fear for human intelligence, and also a great deal for human unintelligence.

References

1. Eloundou, T.; Manning, S.; Mishkin, P.; Rock, D. GPTs are GPTs: Labor market impact potential of LLMs. *Science*, 2024, 384(6702):1306-1308. doi: 10.1126/science.adj0998.
2. Mitchell, M. *Complexity: A Guided Tour*. Oxford University Press: Oxford (UK), 2009. doi: 10.1093/oso/9780195124415.001.0001.
3. Cauchy, A.L. Méthode générale pour la résolution des systèmes d'équations simultanées. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 1847, 25:536-538.
4. Ladyman, J.; Lambert, J.; Wiesner, K. What is a complex system?. *European Journal for Philosophy of Science*, 2013, 3:33-67. doi: 10.1007/s13194-012-0056-8.
5. Skrimizea, E.; Haniotou, H.; Parra, C. On the complexity turn in planning: An adaptive rationale to navigate spaces and times of uncertainty. *Planning Theory*, 2019, 18:122-142. doi: 10.1177/1473095218780515.
6. Lorenz, E.N. Deterministic Nonperiodic Flow. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1963, 20(2):130-141. doi: 10.1175/1520-0469(1963)020<0130:DNF>2.0.CO;2.

7. Poincaré, H. Sur le problème des trois corps et les équations de la dynamique. *Acta Matematica*, 1890, 13(1-2):VII-XII. doi: 10.1007/BF02392505.
8. Russel, S.J.; Norvig, P. *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. Pearson Education: Hoboken NJ (USA), 2020. ISBN: 9780134671932.
9. Rocetti, M.; Teolis, A.G.B. Sulla correttezza probabilistica dei sistemi esperti. *Statistica*, 1991, 51:267-299. doi: 10.6092/issn.1973-2201/871.
10. Haykin, S. *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*. Prentice Hall: Hoboken, NJ (USA), 1999. ISBN: 978-0132733502.
11. Rumelhart D.E.; Hinton G.E.; Williams R.J. Learning representations by back-propagating errors. *Nature*, 1986, 323:533-536. doi: 10.1038/323533a0.
12. Li Calzi M. Chi è Custode della Verità?. *Il Foglio*, 2025. 189, 3, anno XXX.

La comunicazione, ponte tra intelligenza naturale e intelligenza artificiale

Silvano Tagliagambe

Professore emerito di Filosofia della scienza – Università di Sassari

Contributo presentato da Pierluigi Contucci

Abstract

Defining intelligence is problematic. I therefore share with Contucci the idea, proposed by him, on the basis of an intuition that has made its way into the era of artificial intelligence, that it is a relational, dynamic process, continually traversed by exchanges, codifications, selections and inhibitions. It is, first and foremost, communication. This statement now finds surprising confirmation also on a technical and philosophical level. The observation of the functioning of silicon brains that learn by iterations, errors and adjustments, reveals a dual structure of interaction: each connection between neurons can be excitatory or inhibitory, and the emergent quality of the whole system, i.e. its intelligence, depends as much on one as on the other. It is in the freedom of connections and their continuous communication, no matter whether cooperative or conflictual, that the possibility of learning is rooted.

Keywords

Communication, Action, Inhibition, Cooperation, Conflict

1. Premessa

Definire l'intelligenza è problematico: condivido con Contucci [1] l'idea che essa sia, prima di tutto, comunicazione, un processo relazionale, dinamico, continuamente attraversato da scambi, codificazioni, selezioni e inibizioni.

Questa affermazione trova conferme sia sul piano tecnico che filosofico. Da una parte, l'osservazione del funzionamento delle reti neurali artificiali, che apprendono per iterazioni, errori e aggiustamenti, rivela una struttura duplice di interazione: ogni connessione tra neuroni può essere eccitatoria o inibitoria, e la qualità emergente dell'intero sistema, cioè la sua intelligenza, dipende tanto dall'una quanto dall'altra. È nella libertà delle connessioni e nella loro comunicazione continua, non importa se cooperativa o conflittuale, che si radica la possibilità dell'apprendimento.

Dall'altra parte, il pensiero filosofico, a partire da Kant, ci invita a riconoscere che non esiste conoscenza senza vincolo, né percezione senza struttura. I sensi non descrivono il mondo: lo interrogano. Il cervello, nella sua apertura all'ambiente, seleziona, filtra, interpreta. In questo gioco di vincoli e possibilità, la comunicazione non è un'espressione accessoria dell'intelligenza: è la sua condizione di esistenza.

Ne emerge il concetto di intelligenza come capacità di abitare l'incertezza attraverso un ordine relazionale che non è dato a priori, ma si costruisce per continuità di scambio, per tensione costante tra azione e inibizione, tra selezione e apertura, tra impulso e riflessione.

Questa prospettiva aiuta a sciogliere alcuni nodi semantici e teorici che da tempo affliggono il dibattito pubblico e accademico: l'equivoco tra mente e macchina, la confusione tra analogia e identità, la riduzione dell'intelligenza a calcolo o efficienza. Il filo conduttore qui proposto è che intelligenza e comunicazione, natura e artificio, non stanno agli estremi opposti di un continuum, ma si incrociano in uno spazio di possibilità condivise, di cui il linguaggio, e l'informazione che esso veicola, è il terreno comune.

C'è, in fondo, un principio che affiora con crescente chiarezza assumendo questo punto di partenza: l'intelligenza è il frutto di una continua metabolizzazione di conflitto e cooperazione, non come poli da armonizzare in una sintesi, ma come forme distinte e coessenziali di relazione, ciascuna con pari dignità, senza che si possa far "collassare" l'una nell'altra. Ciò che rende un sistema intelligente non è solo la loro alternanza o il loro equilibrio, ma la permanenza del canale che le collega: la comunicazione.

In questa luce, intelligenza è una condizione relazionale in cui a contare non è l'accordo o il disaccordo, ma il fatto che non si smetta di comunicare.

2. Il nesso tra intelligenza e comunicazione

Merito di Kant è quello di aver proposto [2] un approccio autocritico che mette in evidenza un aspetto fino a quel momento trascurato, e cioè che la conoscenza non può essere considerata un processo incondizionato e privo di vincoli. Lo aveva già messo in evidenza, con estrema chiarezza, nelle *Lezioni di etica*, tenute nel 1775-81, nelle quali si era soffermato sulla funzione determinante del riferimento alle diverse declinazioni del corpo, con le quali la ragione è inevi-

tabilmente intrecciata: “il corpo costituisce la condizione assoluta della vita, a tal punto che noi non possiamo avere un’idea di un’altra vita se non mediante il nostro corpo e non ci è possibile usare della nostra libertà se non servendoci di esso [...]. È mediante il corpo che l’uomo ha un potere sulla sua vita” [3] (p. 270).

Nella *Critica della ragion pura* questo aspetto viene ulteriormente approfondito partendo dall’idea che i sensi pongono al messaggio sensibile vincoli precisi determinati dal modo in cui è organizzata e funziona la nostra rete percettiva, che è in grado di “pescare” dall’ambiente circostante soltanto segnali e impulsi conformi alla sua struttura. Ogni volta che percepiamo uno stimolo scattano tre attività strettamente connesse tra loro, quella di sentire, quella di elaborare e quella di prendere coscienza. L’io che riceve questo stimolo è tutt’uno con i vincoli che i sensi pongono al messaggio sensibile, per cui le tre attività suddette sono limitate e condizionate da questi vincoli e non possono essere prese in considerazione senza fare riferimento a essi. Detto in parole povere noi percepiamo solo ciò che ci permettono i nostri sensi.

Le neuroscienze oggi hanno pienamente confermato questo approccio e l’hanno inserito all’interno di un quadro generale che chiarisce che il nostro cervello è un sistema aperto che agisce in stretto legame con l’ambiente nel quale è inserito, dal quale non può essere separato. Diventa quindi cruciale la relazione tra l’organismo e il suo specifico mondo. Ciò significa che se è vero che non può esistere un organismo senza un ambiente, altrettanto vero è che l’ambiente al quale dobbiamo far riferimento quando parliamo di un determinato organismo non è quello generico e indifferenziato, il mondo fisico che continuerebbe a esistere anche in assenza della specie al quale esso appartiene, bensì quello caratterizzato dal complesso di stimoli che gli sono specifici e che è in grado di recepire, e che sono pertanto compresi in una rete che porta alla sua esistenza. Ogni forma di vita ritaglia il proprio ambiente secondo le strutture percettive e la conformazione che la contraddistinguono. Uno stimolo per essere tale non deve solo prodursi ma deve anche essere avvertito, presuppone cioè l’interesse e la capacità ricettiva del vivente; dunque, *non proviene dall’oggetto ma dalla domanda del vivente*. Di tutta la ricchezza di cui un determinato ambiente è costituito, in quanto elargitore di perturbazioni potenzialmente illimitate, l’organismo non ritiene che alcuni segnali. Ciò che chiamiamo “ambiente” per l’organismo rappresenta pertanto una selezione di parte dell’intero ambito territoriale che solo esso riesce a percepire. Ciò che l’ambiente offre al vivente è funzione della domanda stessa.

Ogni nicchia coevolutiva umana è anche una nicchia culturale, per cui non si tratta solo di una descrizione biologica, ma di quella che Laland, Odling-Smee e Feldman chiamano una “prospettiva eco-cognitiva” [4] (pp. 131-175).

Nella relazione che s’instaura tra il nostro cervello e il suo ambiente i sensi non sono interessati a sapere come è fatto il mondo e a rappresentarselo: la loro funzione è di *metterci in contatto con il mondo* e farci agire di conseguenza. Le loro priorità sono quella di percepire velocemente, piuttosto che con precisione, qualora velocità e precisione fossero in conflitto, e quella di rilevare il movimento e i cambiamenti, piuttosto che le persistenze. Tutto ciò chiarisce la differenza tra attività cerebrale e percezione cosciente della stessa.

Dal punto di vista biologico, la nostra osservazione del mondo non è contemplativa e rappresentativa: non c’è percezione che non sia finalizzata all’azione, non c’è rilevamento di stimolo che non sia un suggerimento per la messa in atto di un comportamento, possibilmente il

più appropriato. I nostri sensi non osservano il mondo, ma lo interrogano sulla base di domande predefinite con risposte che lo sono quasi altrettanto. Tutto il nostro sistema nervoso ha per compito principale il produrre e lo scambiare messaggi tra il mondo e noi, tra noi e noi e tra noi e la vita. Ecco perché la comunicazione è cruciale e può essere considerata la funzione fondamentale di un sistema intelligente. Possiamo considerare il mondo come tutto ciò che ci circonda e ci manda continuamente messaggi, alcuni sotto forma di stimoli, altri no. Ciascuno di noi è un organismo che vive nell'ambiente, ne riceve cose e messaggi, che i nostri sensi attendono e vagliano: dobbiamo decidere se restare inerti, bloccare o trasmettere alla nostra potente "antenna" interna, la coscienza. La scelta che ne consegue ha dunque due opzioni fondamentali: trasmettere o bloccare, proseguire con l'azione o attivare l'inibizione, per cui il nostro pensiero è in primo luogo il risultato della scelta tra queste due alternative. Se la comunicazione è la funzione e il compito principale dei sistemi intelligenti la loro vita può essere considerata un susseguirsi e un intrecciarsi di messaggi in uscita e in entrata.

Un altro pregio dell'approccio qui seguito è che esso stabilisce un parallelismo tra una rete neurale artificiale, nelle sue caratteristiche principali, e quelle naturali che si trovano all'interno del nostro cervello, mettendone in evidenza le affinità e le convergenze. Approfondire questo punto è fondamentale per capire la relazione tra l'intelligenza naturale e quella artificiale.

La convergenza tra di esse si basa sul fatto che il messaggio nervoso è una *codificazione* e non è molto diverso da una digitalizzazione. Non sono solo il linguaggio e l'informazione genetica ad avere una struttura digitale, ma anche la generazione e la trasmissione degli impulsi nervosi. Il neurone che deve inviare un messaggio deve prima di tutto decidere se farlo o non farlo, e, in secondo luogo, di che forma farlo. Per quanto riguarda il primo punto il processo di esecuzione è basato sul tutto o nulla, il che costituisce il primo esempio di digitalizzazione, senza gradazioni, senza alternative diverse dal sì o dal no.

Nella relazione cruciale tra il cervello e l'ambiente esiste un passo di codificazione obbligata, addirittura forzata. Il soggetto conoscente non percepisce quello per cui non è attrezzato: il suo ricettore sensoriale, a qualsiasi senso appartenga, non percepisce altro che ciò che può ricevere in quel momento grazie alla sua particolare condizione. La ricezione di messaggi, la parte conclusiva del processo di comunicazione, è pertanto un evento che si alimenta di stimoli esterni, ma che non può assolutamente aver luogo se i recettori sensoriali implicati non sono nella condizione giusta. Per questo, in fondo, il segnale si limita spesso a dire semplicemente sì o no, perché la domanda è già *contenuta nella condizione in quel momento del ricettore*.

La codificazione è quindi un elemento essenziale, costitutivo della nostra percezione del mondo. Un segnale nervoso non parte se non è stato adeguatamente codificato. Lo studio della relazione tra l'intelligenza naturale e quella artificiale ha, come primo e fondamentale compito, quello di esplorare quanto ci sia di digitalizzazione in questa codificazione.

Per impostare in modo adeguato e avviare questo tipo di analisi è necessario chiarire preliminariamente cosa sia l'informazione, in modo da intendere bene come essa possa essere registrata, memorizzata e trasmessa. Si può parlare di *informazione contenuta in un sistema* di qualsiasi tipo quando l'azione di questo su altri sistemi è determinata in maniera essenziale non dalla mera *quantità* o *natura* dei suoi elementi, ma dalla loro *disposizione*, cioè *dall'insieme delle operazioni e relazioni interne*, vale a dire da quello che, tecnicamente, si chiama "struttura".

Si parla poi di trasmissione di informazione quando la riproduzione di una struttura dà luogo a repliche contenenti la stessa informazione. Entrambi i fenomeni, com'è noto, sono essenziali per la conoscenza ma anche per la vita.

Detto diversamente e in modo più informale e accessibile: si parla di informazione se in *macrostrutture* simili sono riconoscibili *microstrutture* differenti. La chiave della mia automobile, del tutto simile alla tua apre, a differenza di questa, la portiera della mia vettura, per cui si può dire che nella microstruttura di questa chiave è contenuta un'informazione che viene trasmessa alla serratura, consentendo di aprirla.

Un altro aspetto da considerare è che *non esiste informazione senza supporto*. L'informazione è sempre "portata da", o "trasmessa su" o "memorizzata in" o "contenuta in" qualcosa; questo qualcosa *non è* l'informazione stessa, come si evince dal fatto che la stessa informazione può essere scritta su supporti differenti e che lo stesso supporto materiale può veicolare informazioni differenti. Alcuni supporti, come ad esempio l'aria, sono particolarmente adatti alla trasmissione dell'informazione, ma non alla sua memorizzazione; per poter parlare di informazione e di sua memorizzazione sono decisive la stabilità e la solidità del supporto materiale in cui l'informazione medesima è contenuta.

Per essere registrata e trasmessa l'informazione va pertanto codificata, in genere su un materiale diverso da quello nel quale si è originata. Per essere registrati e trasmessi un discorso o una conversazione devono essere codificati: l'onda sonora corrispondente deve essere trasformata in un'onda elettrica o elettromagnetica, inclusa, oggi, un'onda luminosa. La codificazione può essere analogica, che riproduce punto per punto nella maniera migliore possibile il profilo dell'onda di partenza, o digitale, nel qual caso questo profilo è trasformato in una raccolta di dati numerici. Sono esclusivamente questi dati a essere registrati o trasmessi, e sulla loro base verrà poi ricostituita l'intera onda di partenza, o una sua copia abbastanza fedele. La teoria dell'informazione e l'elettronica ci dicono che procedendo in tal modo si guadagna molto in termini di fedeltà e di affidabilità. L'informazione catturata dai sensi si origina già in maniera codificata, attraverso un meccanismo di codificazione digitale estremamente efficiente e piuttosto selettivo.

Se analizziamo poi l'immagine complessiva che viene percepita da ciascun senso ci accorgiamo che alla base della sua composizione c'è una miriade di piccole sensazioni, distinte e individualmente esperite a livello dei recettori sensoriali periferici, che si completano tra loro e infine si fondono. A fornirci questa immagine completa e continua, facilmente interpretabile, è la corteccia cerebrale che utilizza in maniera appropriata e mette insieme, attraverso un processo di elaborazione secondaria, ciò che viene trasmesso dai singoli sensi. Questo processo integrativo non è istantaneo ma richiede diverse decine di millesimi di secondo: ad esempio nel caso della visione l'immagine della medesima scena si forma e si riforma varie volte nella corteccia visiva, con modalità diverse e interessando aree visive differenti e spazialmente distinte: non si può vedere senza il concorso e la confluenza delle rappresentazioni date in queste diverse aree. È solo dal serrato dialogo di queste ultime e delle rappresentazioni della stessa scena che esse contengono che si può ottenere l'immagine visiva definitiva. Per compiere questo lavoro ci vuole tempo e una perfetta organizzazione interna. C'è tutta una serie di osservazioni sperimentali che confermano l'esistenza di mezzo secondo di ritardo della coscienza sugli eventi

cerebrali: e la nostra corteccia cerebrale sente il bisogno di ricostruire l'andamento dei fenomeni in modo da farci credere che questo ritardo temporale non ci sia stato, per cui ci fornisce la sensazione di prendere coscienza di un evento quasi istantaneamente. Noi viviamo dunque nel ricordo: il nostro, come sottolinea il titolo di un'opera di Edelman, è sempre un "presente ricordato" [5].

3. Centralità della coppia opposizionale azione/inibizione

La distinzione operata tra un'informazione che non è oggetto di un processo di trasmissione, in quanto è già contenuta nella rete delle relazioni di una determinata forma o struttura, e l'interazione, che invece presuppone un trasferimento dell'informazione che richiede tempo, ci consente di tornare alla questione di cui parla Contucci: il fatto che il segnale che parte da un mittente e viaggia verso i destinatari non giunge identico a ciascuno di essi. Ogni connessione, infatti, è diversa e dipende dalla peculiare natura del legame sinaptico, ossia dalla relazione che esiste tra i due neuroni. Il fatto cruciale è che questa relazione può essere di due tipi strutturalmente opposti, che provocano, rispettivamente, una risposta eccitatoria o inibitoria.

La teoria dell'inibizione fu proposta da Ivan Michajlovič Sečenov nella sua celebre opera del 1866, comparsa con il titolo *Refleksy golovnogo mozga* (I riflessi encefalici), dopo che la censura aveva rifiutato quello originariamente scelto da lui, e cioè *Popytka vvesti fiziologičeskie osnovy v psichičeskie processy* (Tentativo di porre i processi psichici su basi fisiologiche). In questo suo lavoro vengono forniti i primi elementi di una teoria generale dell'inibizione interna, secondo la quale essa non sarebbe una forma di esaurimento del sistema nervoso, ma rappresenterebbe un processo attivo, che controlla in particolare l'attività sistemica dell'organismo. In tutti i casi di inibizione di una qualsiasi attività globale organica si deve ricercare un'altra attività che la inibisce. Qualsiasi attività globale dell'organismo e del sistema nervoso dimostra la tendenza a essere esclusiva, unica, e l'inibizione rappresenta lo strumento costante per eliminare altre attività di tipo competitivo. Comincia in tal modo a essere messa in risalto la natura *proattiva* dei processi cerebrali, con il passaggio da una fisiologia delle *reazioni* ad una fisiologia dell'*attività*, e il riferimento a un substrato fisiologico che permette di concepire le funzioni cerebrali come un processo di continuo confronto tra i risultati effettivamente ottenuti e il programma d'azione originario.

Il contesto ambientale e le necessità biologiche in cui un organismo si trova in un determinato momento gli consentono di effettuare una "sintesi afferente" che insieme ad attenzione memoria e percezione costituisce la base su cui viene sviluppata l'elaborazione di una determinata "presa di decisione". Una volta fatto ciò il sistema nervoso centrale elabora, contemporaneamente, un "programma d'azione", necessario per dare attuazione a questa decisione, e un modello di controllo dei risultati dell'azione stessa, che rappresenta una previsione dei risultati finali e della loro congruità con gli obiettivi che ci si è proposti di conseguire. È il modo attraverso il quale il nostro organismo ci garantisce la massima efficacia dell'azione e ci permette di agire e di apprendere senza cadere nella più dispendiosa attività per prova ed errore. Una volta portata a compimento l'azione, i suoi esiti produrranno determinate *afferenze di ritorno* che verranno poste a confronto con quanto precedentemente previsto. In

caso di coincidenza tra quanto previsto e quanto effettivamente ottenuto lo scopo dell'azione sarà stato soddisfatto e il ciclo dell'Atto Comportamentale potrà dirsi concluso. Nell'eventualità contraria verrà rilevata un'incongruenza: un segnale di "errore" darà avvio ad azioni di ri-orientamento della sintesi afferente, in modo da renderla più accurata ed efficace, o alla riformulazione di un piano d'azione alternativo basato su una nuova presa di decisione. Il nostro cervello elabora pertanto un'immagine di quanto *prevede* gli occhi debbano vedere. Questa informazione è inviata dal cervello verso gli occhi attraverso stati intermedi. Solo se viene rilevata una discrepanza fra quanto il cervello si aspetta e la luce che arriva agli occhi i circuiti neurali mandano segnali verso il cervello.

All'interno di questa visione generale, il pensiero è articolato in tre fasi distinte ma intimamente connesse tra loro. La prima è quella del "pensiero orientato e diretto verso l'oggetto", che si presenta in forma ancora contaminata dalla percezione sensibile e che contraddistingue la fase di sviluppo antecedente al possesso del linguaggio. Questa fase iniziale è quella in cui il pensiero stesso appare soprattutto sotto forma di automatismi sensoriali, che si compiono sulla base delle azioni più immediate e dirette con gli oggetti con i quali si entra in contatto. La seconda fase è quella del "pensiero simbolico", che si sviluppa grazie all'intervento determinante del linguaggio. La parola subentra all'oggetto della percezione e lo sostituisce, consentendo di prendere le distanze da esso: viene così avviato un passaggio, sempre più marcato, del baricentro del processo conoscitivo dall'esterno all'interno [6], che prelude alla fase più elevata e complessa, la terza, quella del "pensiero astratto", in qualche modo sottratto all'influsso dell'apparato percettivo.

La base di partenza del pensiero, soprattutto nelle sue due prime espressioni, è "il raffronto tra gli oggetti che costituiscono il suo materiale di elaborazione l'uno con l'altro sotto una qualche relazione" [7] (p. 277). Ad acquisire una funzione determinante non sono quindi le *proprietà* degli oggetti con i quali si entra in contatto ma le *relazioni* tra di essi, in particolare, quella di somiglianza e differenza; quella di contiguità nello spazio, cioè la relazione di coesistenza; quella di successione nel tempo. Il pensiero astratto trasforma queste relazioni in nessi causali e in legami soggetti alla giurisdizione e al vincolo di una legge.

Quello prospettato da Sečenov è dunque un approccio capace di tenere insieme cervello, corpo ed esperienza e che mira a spiegare l'origine corporea della capacità simbolica dell'essere umano attraverso l'articolazione interna del pensiero di cui si è detto: A essa corrispondono degli "equivalenti fisiologici", relativi a ciascuna delle sue fasi, che costituiscono la base universale della struttura del pensiero medesimo, indipendente da ogni differenza. L'infrastruttura delle varie manifestazioni del pensiero orientato agli oggetti è ad esempio rappresentata da tre differenti reazioni di percezione, due delle quali, quelle collocate agli estremi, riguardano gli oggetti verso i quali è diretta l'attenzione, mentre quella intermedia stabilisce il tipo di relazione che li lega: "A un *nesso* corrisponde perciò sempre una reazione *motoria* di un organo di senso, che entra a far parte della composizione dell'atto percettivo" [7] (p. 363). Nei processi di analisi e sintesi che si sviluppano nelle pratiche conoscitive assumono particolare rilievo le azioni che si esercitano sugli oggetti, "in particolare, il movimento delle mani con il quale si cerca di afferrarli e quelli che puntano invece a dividerli in parti e a ricomporli" [7] (p. 376).

La conoscenza viene così radicata nella dimensione motoria del nostro corpo, ovvero nel movimento e nell'azione, sin dall'insorgere dell'attività percettiva, che della conoscenza è parte attiva e co-determinante.

Visto in quest'ottica il pensiero non è *produzione* attiva, bensì *inibizione*, conseguenza del differimento di un'azione di risposta sino al momento in cui non si siano presentate le condizioni opportune per un suo efficace dispiegamento. Esso è dunque l'effetto dell'azione dei meccanismi cerebrali inibitori dei riflessi, che introducono elementi di variazione e nuove articolazioni nel campo delle azioni riflesse. In questo modo viene fatto progressivamente emergere, accanto al dominio dell'effettualità, quello delle risposte immediate e dirette, il regno della possibilità, dando avvio a un rapporto sempre più complesso tra quest'ultima e la realtà. All'automaticità delle azioni riflesse pure cominciano così ad affiancarsi forme miste, risultato della combinazione delle prime con elementi psichici, come la paura e il piacere, che sono determinanti primordiali, dettati dall'istinto di conservazione e capaci di sospendere o rafforzare i moti riflessi. Dietro il pensiero si affaccia così la componente emotiva, che ha una funzione importante nell'orientarne i contenuti [6]. Riprendendo e sviluppando le conclusioni di un suo articolo del 1861, dal titolo *Dve zaključitel'nyh lekcii o značenii tak nazyvaemykh rastitel'nych aktov v životnoj žisni* (Due lezioni conclusive sul significato dei cosiddetti atti vegetativi nella vita animale), dove aveva proposto l'idea di un'unità indissolubile tra gli organismi e le condizioni ambientali in cui si svolge la loro esistenza, Sečenov nella sua opera principale riafferma l'impossibilità anche soltanto di pensare la vita indipendentemente dall'ambiente esterno che l'alimenta. Per questo nella stessa definizione scientifica di organismo, a suo parere, deve entrare necessariamente il riferimento non solo a quest'ambiente e all'influenza che esso esercita fin dall'inizio sulle funzioni e sull'attività dell'organismo medesimo, ma anche ai principi che sono alla base della regolazione e del mantenimento dell'equilibrio tra i due termini di questa relazione costitutiva. Ciò che chiamiamo "istinto di conservazione" è l'espressione della presa d'atto, da parte dell'organismo, dell'importanza determinante, ai fini della propria sopravvivenza, dell'ambiente e di un rapporto equilibrato con esso: e la paura e il piacere, a conferma del nesso indissolubile tra i processi cognitivi e la componente emotiva, sono le manifestazioni più immediate e dirette della percezione di una maggiore o minore lontananza di questo obiettivo.

Grazie all'intervento di questi elementi psichici l'organismo impara a "controllare" le proprie azioni e a distribuirle nel modo più opportuno nel tempo. Alle passioni, corrispondenti a riflessi psichici tendenti al rafforzamento, comincia così a subentrare la capacità di sospendere il movimento sulla base di un calcolo. La facoltà di riflettere e ragionare è l'espressione di questa capacità, sviluppata in modo particolare dall'uomo, di "conservare l'ultimo anello di un riflesso". Si capisce così il senso della definizione che Sečenov propone del pensiero come un processo "costituito dai primi due terzi di un riflesso psichico", nel senso che esso comprende l'inizio del processo, cioè l'eccitazione sensoriale proveniente dalla realtà esterna, e la sua continuazione sotto forma di reazione che essa provoca all'interno dell'organismo, mentre manca, appunto, il terzo ed ultimo anello, quello della risposta sotto forma di movimento e di azione, che viene "congelata" e rimandata a un momento più propizio.

4. P.A. Florenskij: la coscienza punto focale immaginario di un'azione trattenuta

La proposta di Sečenov ebbe immediatamente vasta eco nell'ambiente culturale russo, come risulta dalla testimonianza diretta di N.E. Vvedenskij, suo allievo e immediato successore nella cattedra di fisiologia dell'Università di San Pietroburgo, a giudizio del quale “probabilmente negli anni Sessanta e Settanta del secolo scorso non c'era in Russia nessuna persona di una certa cultura che non avesse letto la sua opera” [8] (p. 75).

Essa viene ripresa e rielaborata dal teologo, matematico e filosofo Pavel Florenskij, profondo conoscitore della tecnologia, e posta alla base della sua definizione della coscienza, la quale, a suo giudizio: “è un riflesso speculare, il punto focale immaginario di un'azione trattenuta. È evidente che, se è così, tale punto focale sarà la raffigurazione – finanche immaginaria – non di una qualche cosa, ma proprio di *quella determinata* azione trattenuta. I raggi che, intersecandosi, formano un quadro dell'azione trattenuta sono, pur se immaginari, la prosecuzione di quegli stessi raggi trattenuti. [...] Di conseguenza l'azione può o realizzarsi direttamente, espandersi nella sua naturale, per così dire, grandezza e disperdendosi nel mondo circostante, oppure può trattenersi, accumularsi, accrescendo il proprio potenziale, può riflettere, raccogliersi, dare una raffigurazione immaginaria, e *tale* immagine si realizza allora in un *altro* ambiente, che solo mentalmente si riflette nell'ambito della natura, e della natura pare una parte, ma che in realtà, essendo *corpo*, del corpo risulta essere una *prosecuzione*, una sorta di corpo umano germogliato nella natura” [9] (p. 158).

Prendendo avvio da Sečenov Florenskij fa propria la centralità dell'inibizione, l'approfondisce e ne fa la base teorica di un processo di pensiero nel quale le mente costruisce sé stessa nell'ambiente circostante, trasferendosi in altri spazi e dando luogo, attraverso l'immaginazione produttiva, alla prosecuzione dell'azione interrotta a cui riesce a fornire una espressione incarnata [10], “un impulso materializzato che chiamiamo *strumento*”. Siamo dunque in presenza di “raggi immaginari”, di un'azione puramente virtuale, che di colpo si sposta in un *altro* ambiente, con il quale la mente arricchisce e potenzia l'ambito della natura esterna, l'insieme dei suoi oggetti separati e distinti, ma che, in realtà, risulta una sorta di *prosecuzione del corpo*.

Il tema della tecnica come espressione di questa relazione che la mente intrattiene con la materia, cioè con la propria alterità per antonomasia, e che costituisce la sostanza stessa della sensibilità, è cruciale in Florenskij e viene non a caso ripreso nei due saggi [11] e [12]. Si tratta di un rapporto *immaginale*, financo “allucinatorio” [12] (pp. 198-199), espressione della convinzione che, come la percezione ha in sé una certa dimensione allucinatoria o illusionistica, ugualmente qualunque attività organica avrà il carattere di un'immaginazione produttiva: “I prodotti della creazione possono e devono essere visti quali sogni incarnati, fantasie reificate, allucinazioni materializzate e consolidate. [...] Anche gli strumenti della tecnica altro non sono che simboli della nostra vita interiore concretizzatisi nella materia – e proprio nella materia solida –, modi d'essere della nostra relazione con la realtà, con l'ambiente” [13] (p. 202).

Siamo così posti di fronte a un *campo di tensioni che, come si è detto, tiene assieme mente, corpo e ambiente*, sdoppiato in un aspetto passivo, una “materia morfogenetica” e in uno attivo, una “energia morfogenetica” [13] (p. 207). Si tratta di un'attività irriflessa, “sovracosciente”, “oni-

ropoietica” [13] (p. 207) della vita stessa: una sorta di immaginazione trascendentale, irriducibile a un soggetto, che si rifrange “come in sogno” in spazi forieri di una propria “precipua infinità”.

Florenskij la definisce ancora “fantasia produttiva e artistica” [12] (p. 194), capace, nella sua smisurata fecondità, di “disegnare le sue immagini con incredibile pienezza, imponenza e forza. [...] Immagini dal valore non inferiore a quelle della vita diurna, non uguali e non peggiori, ma diverse, con le *proprie* gradazioni e una *propria* logica” [12] (p. 194).

Questa fantasia produce un rovesciamento di prospettiva, un’inversione del *senso* del mondo, impossibile sul piano fisico, ma che può tuttavia essere descritta, dapprima psicologicamente nello spazio-tempo “teleologico” dei sogni, che procede “dagli effetti alle cause”, come viene detto all’inizio di *Ikonostas* [14]; poi, geometricamente, nel saggio sui *Punti Immaginari*, come il passaggio a velocità infinita, attraverso uno “spazio fratto”, a superfici negative: “Una realtà altra, [dove] intervengono allora condizioni qualitativamente nuove per l’esistenza dello spazio, caratterizzate da parametri immaginari [...] Possiamo immaginare tutto lo spazio come *doppio*, in quanto costituito dalle superfici reali e da quelle immaginarie, ma il passaggio dalla superficie reale a quella immaginaria è possibile solo fratturando lo spazio e girando il corpo dentro di sé” [15] (p. 62).

Anche l’oggetto tecnico è la manifestazione di una analoga dicotomia, in quanto presenta una bipolarità intrinseca, espressa da una faccia rivolta all’interno, *centripeta* e individuale, e un’altra rivolta all’esterno, *centrifuga* e relazionale. Mentre la prima esibisce una sua singolare specificità, una sua unità funzionale, la seconda tende a differenziarsi e mutare costituendo un tramite tra realtà eterogenee, un’entità intermedia tra i corpi e il mondo. Parola e strumento producono ugualmente “un canale di collegamento tra ciò che finora era separato”, azzerando la distanza spaziale in un singolo punto di confluenza, e presentandosi quindi come “un isotopo ontologico” [16] (p. 33). Qualunque prodotto della tecnica stabilisce nella sua duplice frontalità un simile grado zero di separazione. La parola e lo strumento, *hanno entrambi una natura comunicativa*, e fungono efficacemente da raccordo tra il mondo interiore e la realtà esterna proprio in virtù del fatto che sono, ugualmente, tanto una parte dell’ambiente che circonda l’organismo, quanto “un’*azione-organo*, in quanto l’oggetto non può essere pensato *al di fuori* della sua funzione, e ogni membro del corpo costituisce un tutt’uno inscindibile con l’azione che compie” [11] (p. 160).

5. I due sistemi di pensiero e i bias cognitivi

A proposito della relazione tra informazione e comunicazione è di particolare rilievo la distinzione tra due sistemi di pensiero che usiamo nella vita quotidiana operata da Amos Tversky e Daniel Kahneman, entrambi psicologi cognitivi israeliani. Al secondo, e non anche al primo, deceduto prematuramente nel 1996, nel 2002 è stato conferito il Premio Nobel dell’economia (“per avere integrato risultati della ricerca psicologica nella scienza economica, specialmente in merito al giudizio umano e alla teoria delle decisioni in condizioni d’incertezza”):

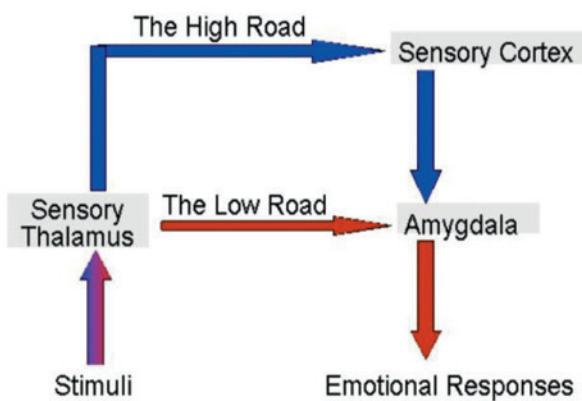
- il Sistema 1, intuitivo, veloce e automatico: opera in fretta e automaticamente con poco o nessuno sforzo cognitivo e nessun senso di controllo volontario;

- il Sistema 2, deliberativo, logico e lento, associato al pensiero critico: indirizza l'attenzione verso le attività mentali impegnative che richiedono focalizzazione, come le situazioni e i calcoli complessi.

Questi due sistemi sono mutuamente esclusivi, nel senso che quando ci concentriamo in un compito che esige la focalizzazione dell'attenzione, tipica del Sistema 2, non riusciamo a prestare attenzione a nient'altro. Essi hanno una diversa *accessibilità*, termine con il quale ci si riferisce al grado di facilità e immediatezza con il quale i contenuti di pensiero vengono in mente. Ovviamente il Sistema 1, per il basso livello di sforzo cognitivo che richiede, ha un grado di accessibilità molto più alto del Sistema 2. Si tratta di un aspetto di estrema importanza e che non può essere ignorato, in quanto l'accessibilità condiziona le nostre decisioni, poiché caratteristiche facilmente accessibili influenzano le nostre scelte, mentre quelle di bassa accessibilità tendono a essere ignorate.

Gli errori sistematici, che Kahneman e Tversky chiamano “bias cognitivi”, sono spesso causati proprio da questa *accessibilità differenziale* e dalla tendenza a sostituire uno specifico attributo obiettivo di un oggetto di giudizio, che ha tratti di bassa accessibilità, con un attributo euristico correlato, che ha caratteristiche di elevata accessibilità e viene più prontamente in mente.

Queste idee di Kahneman e Tversky sono state riprese e approfondite dalle neuroscienze, che hanno evidenziato i processi cerebrali sottostanti alla differenza tra questi due Sistemi e i rispettivi gradi di accessibilità. Il 5 novembre del 1996, ad esempio, Joseph LeDoux, direttore del Center for the Neuroscience of Fear and Anxiety di New York, ha rilasciato un'intervista al New York Times in cui ha teorizzato la presenza di quella che ha chiamato la “doppia via” di elaborazione dell'informazione da parte del cervello, che può essere così schematizzata:



LeDoux: Tracing Emotional Pathways (NY Times Nov. 5, 1996)

La via rossa (The low road) corrisponde al Sistema 1 di Kahneman: è veloce e immediata, in quanto lo stimolo passa direttamente dal talamo sensoriale all'amigdala e produce una risposta di tipo emotivo che taglia fuori i processi cognitivi della Corteccia sensoriale, che sono invece implicati nel Sistema 2.

È importante sottolineare che questi due sistemi oggi si affidano sempre di più a input di informazioni che provengono da strumenti tecnologici basati sui dati (ad esempio, la ricerca Google, Google Maps, ChatGPT e altri assistenti AI). Questi strumenti elaborano grandi quantità di dati e forniscono informazioni curate agli utenti, agendo di fatto come intermediari tra il mondo esterno e i nostri sistemi cognitivi. Pertanto, i Sistemi 1 e 2 non operano più esclusivamente su informazioni acquisite tramite esperienza diretta o fonti tradizionali, ma sono ora fortemente influenzati dagli output di questi strumenti basati sui dati. Ad esempio, se ci troviamo di fronte a una domanda (come “dove trovare la strada per tornare a casa”) o a una scelta, la nostra risposta intuitiva immediata (Sistema 1) e il nostro ulteriore pensiero analitico (Sistema 2) di solito attingono alle informazioni recuperate e sintetizzate dai motori di ricerca, dalle basi di conoscenza o dagli assistenti conversazionali alimentati dall’intelligenza artificiale. Questa integrazione della tecnologia nei nostri processi cognitivi è diventata così fluida che potremmo non riconoscere nemmeno consapevolmente la misura in cui il nostro pensiero è modellato da questi sistemi esterni basati sui dati.

Dobbiamo pertanto riflettere su come stia cambiando il modo in cui gli esseri umani pensano e prendono decisioni chiedendoci, in particolare, se alcuni degli strumenti tecnologici recenti e in evoluzione, in particolare i sistemi di intelligenza artificiale (IA) basati sui dati, stiano di fatto diventando un’estensione delle nostre menti, come afferma la tesi della *mente estesa*, proposta nel 1998 da Andy Clark e David Chalmers [17], basata sull’ipotesi che alcuni artefatti esterni possano essere integrati funzionalmente nei nostri processi cognitivi, formando un sistema cognitivo più ampio. Essa parte dal presupposto che se, nell’affrontare un certo compito, una parte dell’ambiente funziona come un processo che non avremmo esitazione a considerare parte del processo cognitivo se si realizzasse nella testa, allora quella parte dell’ambiente va considerata una componente della cognizione, i cui processi, pertanto, contrariamente a ciò che si crede, non sono tutti nella testa. Ciò significa che la mente umana si estende oltre i confini del corpo è *distribuita* sempre più nell’ambiente naturale e sociale.

6. Conclusione

La compresenza di impulso e riflessione, come le altre rilevate in precedenza tra azione e inibizione, tra selezione e apertura, tra percezione e immaginazione, è una delle idee guida fondamentali del pensiero di Florenskij, secondo il quale per pensare spesso, piuttosto che escludere, abbiamo bisogno di accoppiare, di far interagire e di mantenere in uno stato di mutua tensione cose solo apparentemente incompatibili.

Questa coesistenza di opposti lo porta a definire la verità come “*intuizione-discorso*”. A suo giudizio essa “è un’intuizione dimostrabile, ovvero è discorsiva. Per essere dimostrabile (discorsiva), l’intuizione non deve essere cieca, ottusamente limitata, ma deve aprirsi sull’infinito, deve, per così dire, essere parlante, ragionevole. D’altra parte, la *discursio* non deve andare nell’indefinito, deve essere non solo possibile ma reale, attuale” [18] (p. 51).

Questa concezione della verità come *coincidentia oppositorum* è necessaria se non si vuole rimanere intrappolati nell’idea kantiana di un noumeno inconoscibile: anche se tra quest’ultimo e il fenomeno è presente una linea di demarcazione che non può essere eliminata bisogna, tut-

tavia, partire dal presupposto che: “il confine è la demarcazione che separa il visibile dall’invincibile, la terra dal cielo: esso non è un muro, pur distinguendoli unisce, mette in comunicazione i due elementi, altro non è che il loro punto di contatto. [...]. Eppure, nonostante quest’ultimo, essi differiscono tanto che non può non sorgere il problema della ‘linea di confine’ di quel contatto” [19] (p. 19).

Ancora una volta la centralità della comunicazione, dunque. La relazione che sussiste tra il fenomeno e il noumeno secondo Florenskij può essere assimilata a quella tra il visibile e l’invincibile, per cui anche in questo caso il confine ha la duplice funzione di linea di demarcazione e di ponte che mette in comunicazione: “anche in noi stessi il vivere nel visibile si alterna con il vivere nell’invincibile. E perciò ci sono momenti – seppur brevi, ridotti, a volte della durata di un solo istante – quando i due mondi si toccano e noi possiamo contemplarne il contatto” [19] (p. 19).

Postulare questo punto di contatto è fondamentale, perché se non si riesce a cogliere il nesso tra ontologia ed epistemologia, cioè tra la realtà in sé e la sua conoscenza, e non si perviene a pensare che ogni ontologia è sempre anche epistemologia e viceversa, la questione della verità diventa un mistero che non può in alcun modo venire affrontato. L’approccio da seguire è allora quello di pensare nell’intuizione, data la quasi immediatezza con cui lo si coglie, l’epistemologia nell’ontologia e l’ontologia nell’epistemologia, *mettendole in comunicazione reciproca*.

Bibliografia

1. Contucci, P.I. *Intelligenza artificiale, oltre la tecnologia*, il Mulino: Bologna, 2025; URL: <https://www.rivistailmulino.it/a/intelligenza-artificiale-oltre-la-tecnologia>.
2. Kant, I. *Kritik der reinen Vernunft*, Auflage, 1781, bei J.F. Hartknoch, tr. it. di G. Gentile e G. Lombardo-Radice, *Critica della ragion pura*; Laterza: Bari, 1965.
3. Kant, I. *Eine Vorlesung Kants über Ethik Philosophia practica universalis*, P. Menzer (ed.); Rolf Heise: Berlin, 1924. Raccoglie le lezioni di etica tenute da Kant nel 1775-81, alla vigilia della prima edizione della *Critica della ragion pura* (trad. it. a cura di A. Guerra, *Lezioni di etica*; Laterza: Roma-Bari, 2004).
4. Laland, K.N.; Odling-Smee, F.J.; Feldman, M.W. Niche construction, biological evolution, and cultural change. *Behavioral and Brain Sciences*, 2000, 23(1), 131-175.
5. Edelman, G.M. *The Remembered Present: A Biological Theory of Consciousness*; Basic Books: New York, 1990; tr. it., Rizzoli: Milano, 1991.
6. Cfr. Vallortigara, G. *Pensieri della mosca con la testa storta*; Adelphi: Milano, 2021.
7. Sečenov, I.M. *Izbrannye proizvedenija* (Opere scelte); Nauka: Moskva, 1952, vol. I.
8. Vvedenskij, N.E; Sečenov I.M. In I.M. Sečenov, I.P. Pavlov; Vvedenskij N.E. *Fiziologija nervnoj sistemy* (Fisiologia del sistema nervoso); Nauka: Moskva, 1952, vol. I.
9. Florenskij, P.A. Prodolženie našich čuvstv (La prosecuzione dei nostri sensi), *Simvol*, 1992, 28, 135-152, tr. it. in Id. *Il simbolo e la forma. Scritti di filosofia della scienza (SF)*, a cura di N. Valentini e A. Gurelov, trad. it. di C. Zonghetti; Bollati-Boringhieri: Torino, 2007.
10. Gallese, V.; Morelli, U. *Cosa significa essere umani? Corpo, cervello e relazione per vivere nel presente*; Raffello Cortina: Milano, 2024.

11. Florenskij, P.A. Organoproekcija (La proiezione degli organi). In *Sočinenija v četyrech to-mach* (SČT) (Opere in quattro volumi), 3/1; Mysl', Moskva, 1999, pp. 402-421; già parzialmente in *Dekorativnoe iskusstvo SSSR*, 1969, 145, 39-42; e *Simvol*, 1992, 28, 153-170; ed. it. SF, pp. 159-184).
12. Florenskij, P.A. Simvolika videnij (La simbolica delle visioni). *SČT*, 3/1, pp. 422-433, già in *Simvol*, 1992, 28, 171-82, ed. it. SF, pp. 185-200.
13. Florenskij, P.A. Chozjajstvo (Lo strumentario), Prima pubblicazione postuma in *Simvol*, 1992, 28, 183-187, ed. it. SF, pp. 202-207. L'aggettivo composto *formo-obrazujuščaja* significa letteralmente “formativa, generatrice di forma”, reso nella traduzione italiana come “morphopoietica”.
14. Forenskij, P.A. *Ikonostas*; Mifril: Sankt-Peterburg, 1993, tr. it. *Le porte regali. Saggio sull'icona*, a cura di E. Zolla; Adelphi: Milano, 1977.
15. Florenskij, P.A. *Mnimosci v geometrii. Rasširenje oblasti dvuchmernych obrazov geometrii. Opyt novogo istolkovanija mnimoscej* (I punti immaginari in geometria. Estensione del dominio delle immagini bidimensionali in geometria. Esperimento di una nuova interpretazione dell'immaginario), Pomor'e: Moskva, 1922; tr. it. parziale in S.F., pp. 278-289. Tr. it. completa *Gli immaginari in geometria*, a cura di A. Oppo e M. Spano; Mimesis: Milano-Udine, 2021, p. 62.
16. Florenskij, P.A. Maginot' slova (Il valore magico della parola). In Id. *U vodorazdelov mysli (Agli spartiacque del pensiero)*, a cura dell'igumeno Andronik Trubačëv, M.S. Trubačëva e P.V. Florenskij; Pravda: Moskva, 1990, vol. II, pp. 226-227, tr. it. in *Il valore magico della parola*, traduzione e a cura di G. Lingua; Medusa: Milano, 2001.
17. Clark, A.; Chalmers, D. The Extended Mind. *Analysis*, 1988, 58/1, 7-19.
18. Florenskij, P.A. Stolp i utverždenie Istiny. Opyt pravoslavnnoj feodicej v dvenadcati pis'mach; Put': Moskva, 1914, tr. it. a cura di N. Valentini, La colonna e il fondamento della verità; San Paolo: Cinisello Balsamo (MI), 2010.
19. Florenskij, P.A. Ikonostas. *Bogoslovskie Trudy*, 1972, 9, 82-148; tr. it. *Iconostasi. Saggio sull'icona*, a cura di G. Giuliano; Medusa: Milano, 2008, p. 19 (testo riveduto secondo l'originale russo).

Printed in December 2025
by Bologna University Press