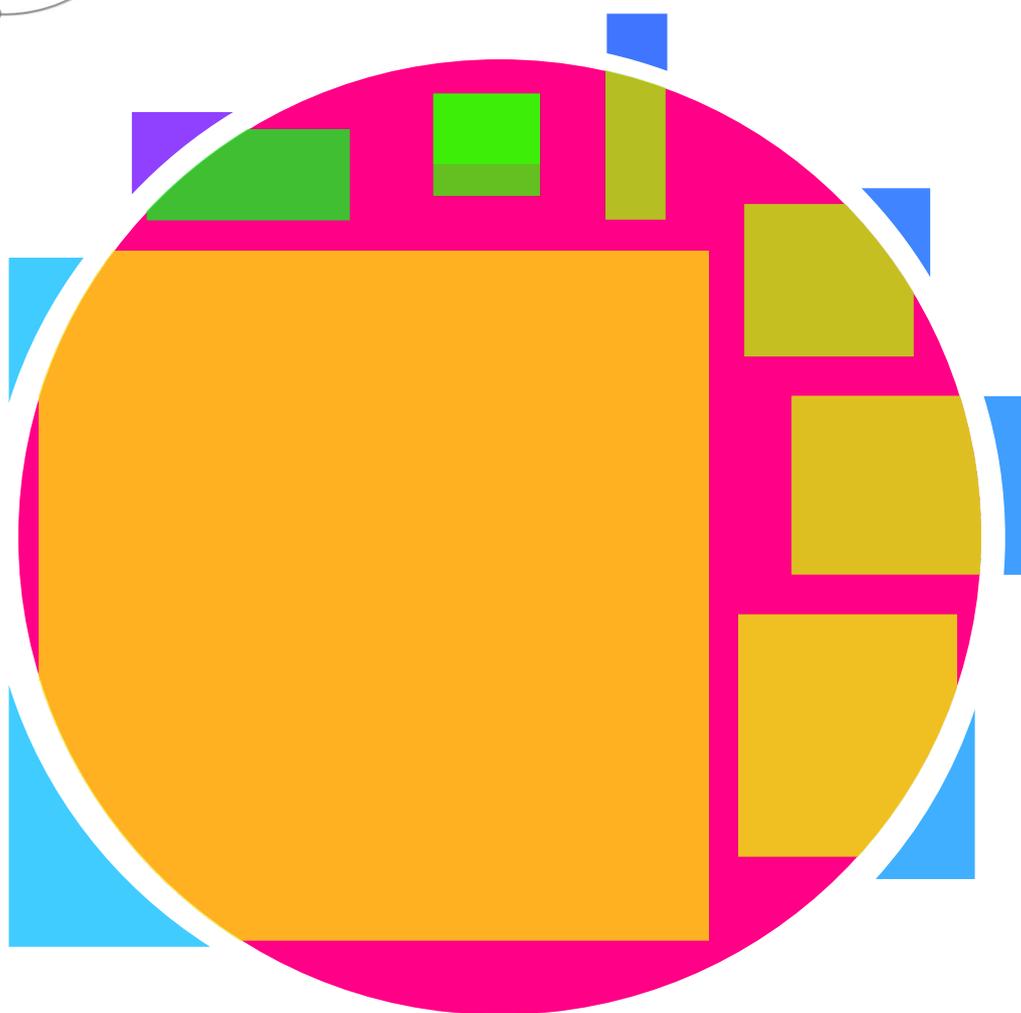


Numero XXIII  
Anno 2024



Viaggio nella Scienza

# Ithaca



Comunicare la scienza, parte A

---

## **Ithaca: Viaggio nella Scienza**

---

Una pubblicazione del Dipartimento di Matematica e Fisica “*Ennio De Giorgi*” dell’Università del Salento

Registrazione presso il Tribunale di Lecce n. 6 del 30 Aprile 2013. e-ISSN: 2282-8079

Direttrice Responsabile  
**Loredana De Vitis**

Ideatore  
**Giampaolo Co’**

Comitato di redazione  
**Adriano Barra,**  
**Rocco Chirivì,**  
**Paolo Ciafaloni,**  
**Maria Luisa De Giorgi,**  
**Vincenzo Flaminio,**  
**Luigi Martina,**  
**Giuseppe Maruccio,**  
**Marco Mazzeo,**  
**Francesco Paparella,**  
**Carlo Sempi.**

Segreteria di Redazione  
**Daniela Dell’Anna**

© 2023-2033 Dipartimento di Matematica e Fisica “*Ennio De Giorgi*”  
© 2023 per i singoli articoli dei rispettivi autori. Il materiale di questa pubblicazione può essere riprodotto nei limiti stabiliti dalla licenza “Creative Commons Attribuzione - Condividi allo stesso modo 3.0 Italia” (CC BY-SA 3.0 IT).

Per il testo della licenza: <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/it/deed.it>

**Ithaca: Viaggio nella Scienza**  
è disponibile al sito  
<http://ithaca.unisalento.it>

Scriveteci all’indirizzo  
[ithaca@unisalento.it](mailto:ithaca@unisalento.it)

**3** In questo numero

**5** La comunicazione scientifica  
Stefano Fantoni

**13** Le modalità di comunicazione della scienza nelle biblioteche accademiche: passato, presente e futuro.  
Laura Viola

**29** Il sogno di una biblioteca digitale di matematica  
Vittorio Coti Zelati

**35** L'editoria scientifica: un labirinto senza uscita?  
Marta Anguiano e Antonio M. Lallena

**45** Il fallimento dell'istruzione e della divulgazione scientifica (con possibili rimedi)  
Ferdinando Boero

- 51** L'accettazione sociale della matematica  
**Daniele Gouthier**
- 55** L'analogia: un potente strumento per la divulgazione della fisica  
**Tommaso Dorigo**
- 63** Sfidare l'ansia da matematica con l'aiuto delle scienze cognitive  
**Luciana Ciringione, Edoardo De Duro, Massimo Stella**
- 73** Termodinamica stocastica: l'ordine nelle fluttuazioni  
**Luca Peliti**

---

# In questo numero

---

La scienza non è più confinata in centri di ricerca e università ma è parte integrante della vita sociale. Questo non solo per le sue ricadute tecnologiche, ma anche, e forse soprattutto, perché fa parte della sfera culturale della nostra società. Usando le parole di Y. Castelfranchi e N. Pitrelli [1]:

“Assieme ad arte, religione e politica, la scienza plasma il nostro modo di vedere il mondo, di pensare, sognare, temere, pianificare. [...] ci fornisce un sistema di simboli, concetti, valori, che aiutano a dare un senso alla realtà, a cercare di dare risposte alle nostre domande, e, soprattutto, a formularne di nuove.”.

Il tema “scienza e comunicazione” è ampio, e complesso, per l’insieme di correlazioni tra i suoi vari aspetti partendo da quello strettamente tecnico-scientifico e culturale per arrivare a quello socio-psicologico, ma anche a quello economico.

**Ithaca** ha già affrontato qualche aspetto di questo tema nel numero IX in cui si parlava di “Scienza e Pseudoscienza”, e nel numero XVII “Dare i numeri: (ab)usi della matematica”. Altri articoli che hanno, di fatto, trattato il problema sono quelli di M. L. Dell’Atti [2] e di S. Lucente [3].

In questo numero di **Ithaca** affrontiamo il problema della comunicazione della scienza da un punto di vista particolare, quello dello scienziato che comunica i risultati del proprio lavoro. Ci sono tre differenti tipologie di pubblico a cui ci si rivolge: i colleghi, la società, gli studenti.

Come già avvenuto in altre occasioni, il numero di articoli da pubblicare ci ha spinto a suddividere il numero XXIII di **Ithaca** in due parti.

Questa Parte A inizia con un articolo di Stefano Fantoni che offre una visione generale dei vari problemi legati alla comunicazione della scienza.

Ancora oggi, il canale privilegiato per comunicare i risultati delle proprie ricerche ai colleghi è la pubblicazione su rivista. La biblioteca è quindi il luogo dove fisicamente si condensa la comunicazione ai colleghi. L’ampio articolo di Laura Viola mette in evidenza il ruolo delle biblioteche accademiche nella società, come questo ruolo si sia modificato in questi ultimi anni e le sfide da affrontare per integrarsi bene in un futuro caratterizzato sempre di più dalle possibilità offerte dall’evoluzione informatica.

In questo contesto si inserisce l’articolo di Vittorio Coti Zelati che parla della possibilità di costruire una biblioteca elettronica, completa ed internazionale, delle riviste di matematica.

Il meccanismo di pubblicazione dei risultati della ricerca in modo da renderli fruibili ai colleghi è organizzato secondo dei protocolli risalenti a quasi un secolo fa. I limiti e i problemi di questo sistema sono presentati in forma aneddotica da Marta Anguiano e Antonio M. Lallena.

Ferdinando Boero rivolge la sua attenzione alla comunicazione della scienza verso la società, considerando come spunto il ruolo dei musei scientifici e tecnologici.

Anche Daniele Gouthier si occupa della percezione della scienza da parte della società, e tratta di un problema molto sentito dagli scienziati, quello della pessima percezione della matematica da parte dei non esperti. Questo sentimento sembra particolarmente accentuato in Italia, rispetto agli altri paesi europei.

L’articolo di Luciana Ciringione, Edoardo De Duro e Massimo Stella tratta dello stesso argomento, non dal punto di vista sociologico, ma da

quello psicologico.

Sempre a cavallo tra la divulgazione e didattica l'articolo di Tommaso Dorigo parla del valore, e dei limiti, dell'analogia, e anche dell'allegoria, nel presentare risultati scientifici a persone non esperte.

Conclude questa prima parte del numero XXIII un articolo più tecnico e non legato al tema principale. Luca Peliti presenta la termodinamica stocastica, una teoria che si propone di descrivere il comportamento statistico di sistemi mesoscopici, di particolare interesse per la descrizione dei sistemi biologici. Gli articoli [4, 5, 6, 7] di **Ithaca** sono collegati a questo tema.

In attesa della Parte B di questo numero, vi auguriamo buona lettura,  
il Comitato di Redazione



- [1] Y. Castelfranchi, N. Pitrelli: *Come si comunica la scienza?*, Laterza, Bari (2007).
- [2] M. L. Dell'Atti: *Sociologia e dimensione sociale della scienza*, Ithaca, IV (2015) 45.
- [3] S. Lucente: *Cosa mettono in comune un comunicatore scienziato e il suo pubblico?*, Ithaca, XXI ParteA (2023) 71.
- [4] G. Sacquegna: *Diverse concezioni dell'entropia*, Ithaca Educational, II (2020) 79.
- [5] E. Agliari, A. Barra: *La meccanica statistica dei sistemi complessi*, Ithaca, XVI (2020) 209.
- [6] A. Puglisi: *Materiali fatti di molecole macroscopiche: dai granulari alla materia attiva*, Ithaca, XVII Parte B (2021) 35.
- [7] L. Peliti: *Il valore dell'informazione*, Ithaca, XIX (2022) 169.



---

# La comunicazione scientifica

**Stefano Fantoni**

*Fondazione Internazionale Trieste per il progresso e la libertà delle scienze, Trieste.*

---

## Introduzione

In occasione della consegna all'UNESCO del premio Kalinga per la comunicazione scientifica, conferitomi nell'Ottobre del 2001, ebbi a dire tra l'altro che

“... non basta diffondere i contenuti della scienza e magari solo le grandi ed eclatanti scoperte. Bisogna diffondere la cultura scientifica, le sue metodologie, rompere i pregiudizi di una scienza infallibile, irraggiungibile e pura. La forza del pensiero scientifico, ma dovrei dire della cultura in generale, è proprio la sua mancanza di purezza. L'essere continuamente contaminato da tendenze, giudizi, elaborazioni, il non porre limiti all'influsso di culture, comportamenti, costumi, linguaggi anche profondamente diversi tra loro. Tutto ciò concorre all'atto creativo di chi fa scienza. Niente è, o dovrebbe essere, meno ideologizzato del pensiero scientifico e niente è più universale di esso. Bisogna far capire che l'unità del sapere emerge piuttosto dal suo modo di interrogare il mondo, di liberare l'intuizione all'interno di una ferrea razionalità, e, in fondo, dalla capacità di mettersi in discussione ...”

In questo articolo, desidero affrontare l'importanza della comunicazione scientifica, come facente parte del sistema della scienza, ed essa stes-

sa oggetto di ricerca, che coinvolge non solo gli scienziati ma anche il pubblico o meglio i pubblici a cui la comunicazione è rivolta, con l'obiettivo di individuare il linguaggio dell'interdisciplinarietà, inevitabile se si vogliono affrontare le problematiche poste dalla società, quali ad esempio quelle inerenti ad una rappresentazione scientifica della sostenibilità.

Lo farò rifacendomi all'esperienza fatta presso il “Laboratorio Interdisciplinare della Scuola Internazionale Superiore di Studi Avanzati (SISSA)” di Trieste, dove, insieme ad altri pionieri, come Franco Pratico e Pietro Greco demmo vita al “Master in Comunicazione della Scienza (MCS)”, negli anni '90, tutt'ora in ottima salute, e che ha celebrato il suo trentennale il 2 Dicembre dello scorso anno. Mi piace qui ricordare che la primissima idea del Master nasce a Lecce, in occasione della mostra “Dai Nuclei ai Quark, viaggio nell'infinitamente, piccolo” [1], organizzata dalla sezione locale dell'INFN, nel Marzo del 1990, dove nel frattempo, ero stato chiamato a ricoprire la cattedra di Fisica Nucleare. Fu infatti in quella occasione che incontrai per la prima volta Franco Pratico e con lui condividemmo, da parte mia la preoccupazione che la comunicazione scientifica non fosse adeguatamente presa in considerazione dai nostri media, e da parte sua che i giornalisti scientifici non disponevano di adeguate strutture per la loro formazione. Nacque quindi come una struttura di formazione per giornalisti professionisti. Ma ben presto capimmo che sia i giornalisti sia gli scienziati

avevano bisogno della stessa struttura e che il modo migliore per svilupparla fosse quella di lavorare insieme per indirizzarla alla formazione di giovani talenti, i futuri giornalisti scientifici, i masterini della SISSA. E così fu. E tutti insieme cominciammo a intraprendere questa avventura sulla comunicazione scientifica e sulla interdisciplinarietà, ben consci che vivevamo una fase nuova dello sviluppo scientifico, del modo di lavorare degli scienziati e del rapporto tra scienza e società: un'era, definita post-accademica da John Ziman [2] e che esige un nuovo modo di comunicare la scienza [3].

Ma entriamo più nel dettaglio. Per farlo abbiamo bisogno di definire, con un qualche rigore, cosa intendiamo per comunicazione della scienza, per era post-accademica della scienza e, prima di tutto, per scienza [4].

## La scienza

Per quell' "insieme di conoscenze ordinate e coerenti, organizzate logicamente a partire da principi fissati univocamente e ottenute con metodologie rigorose, secondo criteri propri delle diverse epoche storiche " [5], che viene chiamato scienza, qui intendiamo solo una delle sue prospettive possibili, quella del sociologo, che guarda ai processi sociali con cui gli scienziati, come comunità, producono e organizzano le loro conoscenze. Infatti, è solo in questa prospettiva che essa assume una centralità assoluta, ed in cui può essere definita come: "un'istituzione sociale dedicata alla costruzione di un consenso razionale d'opinione sul più vasto campo possibile" [6].

In effetti, ogni processo scientifico può essere schematizzato in due stadi fondamentali: lo scienziato che osserva e interroga la natura e lo scienziato che comunica i risultati delle sue interrogazioni. Questi due stadi possono avere forme diverse e anche piuttosto articolate. Tuttavia, non è possibile fare scienza se non passando attraverso il processo che li prevede entrambi: quello privato della osservazione e quello pubblico della comunicazione. In altri termini, non esiste scienza senza comunicazione.

Non è un caso che la scienza moderna sia nata dopo l'invenzione della stampa e, quindi, dopo che si è creata la possibilità tecnica di una comunicazione pubblica e rapida, che consente di

riferire, registrare e discutere i risultati dell'osservazione della natura. Avrebbero avuto lo stesso dirompente impatto, scientifico e culturale, le prime osservazioni del cielo col cannocchiale nell'inverno tra il 1609 e il 1610, se Galileo Galilei non le avesse rese pubbliche immediatamente mandando alle stampe e facendo circolare il suo "Sidereus Nuncius"? La domanda è del tutto retorica. Senza la rapida pubblicazione e diffusione in tutta Europa di quel libro, sia pure stampato in poche centinaia di copie, le rugosità della Luna e la scoperta delle lune di Giove non avrebbero superato il muro dell'attenzione, non sarebbero state immediatamente ripetute e sarebbero affondate nell'oceano delle lente e dotte discussioni scolastiche. Ma, in cosa consiste questo sistema di comunicazione?

## La comunicazione della scienza

Il sistema di comunicazione è il sistema che conferisce una forte dinamica al processo scientifico e contribuisce all'evoluzione della scienza. Ed è esso stesso un sistema in evoluzione che si modifica nel tempo.

Ai tempi di Galileo, cioè all'inizio della scienza moderna, la comunicazione dei risultati scientifici era abbastanza informale: affidata ai libri, oltre che, in parte non banale, agli epistolari e alla oralità.

Ma poi, già partire dalla seconda metà del XVII secolo, la comunicazione della scienza si è andata sempre più formalizzando. Tanto che oggi possiamo distinguere almeno due diverse modalità formali nel modo in cui gli scienziati comunicano tra loro: la letteratura primaria e la letteratura secondaria.

La letteratura primaria è l'insieme di articoli, saggi, documenti che danno notizia di risultati originali dell'attività di ricerca. Il *medium* utilizzato per questo tipo di comunicazione è, essenzialmente, la rivista scientifica le cui pubblicazioni, vengono preventivamente vagliate da uno o più colleghi esperti e anonimi. Questo sistema di revisione ad opera di colleghi, chiamata *peer review*, tende ad assicurare che i risultati pubblicati siano davvero originali, siano stati conseguiti con procedure corrette, e siano significativi.

La letteratura secondaria è invece formata da un insieme di saggi riassuntivi o *review*, di recen-

sioni, di raccolta dati, di bibliografie che non danno notizia di risultati originali, ma organizzano e razionalizzano le conoscenze acquisite.

Insieme, la letteratura primaria e la letteratura secondaria, formano il grande archivio formale della scienza, in cui è raccolta e catalogata l'intera conoscenza scientifica. Questa biblioteca virtuale, ancorché delocalizzata nello spazio e nel tempo, è di estrema importanza. Potremmo infatti dire, parafrasando Pierre-Simon de Laplace, che un'intelligenza che, in un dato istante, conoscesse l'intero archivio della comunicazione formale della scienza, sarebbe in possesso dell'intera conoscenza scientifica prodotta dall'uomo fino a quell'istante. Nulla della scienza umana le sarebbe ignoto.

Ma è davvero tutta raccolta nel grande archivio della letteratura primaria e secondaria la comunicazione rilevante della scienza?

In realtà, gli scienziati non comunicano tra loro solo per iscritto. Comunicano tra loro anche per via orale. Discutendo nei laboratori o al bar. Max Perutz ricordava sempre quanto siano state proficue e quanto peso abbiano avuto nella storia della biologia le discussioni alla mensa dell'Università di Cambridge, all'inizio degli anni '50 [7].

D'altra parte, è noto che uno dei più importanti dibattiti intellettuali dell'epoca moderna si è svolto in modo del tutto informale, tra colazione e cena, nella sala da pranzo di un albergo di Bruxelles, tra il 24 e il 29 ottobre del 1927. L'albergo ospita il Congresso Solvay cui partecipano i tre padri fondatori della teoria dei quanti: Max Planck, Albert Einstein e Niels Bohr. Ci sono anche tutti i padri della nuova meccanica quantistica: De Broglie, Heisenberg, Pauli, Born, Schrödinger. E ancora Paul Dirac, Paul Ehrenfest, Hendrik Kramers. Il conflitto è drammatico. Ma nulla traspare dalle relazioni formali. Tutto si consuma, invece, a tavola. La scena è occupata interamente da Albert Einstein e da Niels Bohr. Einstein solleva problemi. Bohr li risolve. Ecco quello che avviene. "Einstein scendeva a colazione ed esprimeva i suoi dubbi sulla nuova teoria quantistica" ricorda Otto Stern, "e ogni volta aveva immaginato qualche bell'esperimento dal quale si vedeva che la teoria non funzionava [...] Bohr ci rifletteva a fondo e la sera, a cena, quando eravamo tutti riuniti, analizzava minuziosamen-

te il problema fino a chiarirlo" [8]. Quello strano dialogo tra colazione e cena resta una pietra miliare non solo nella tradizione orale ma nella storia stessa della fisica. Segna il momento in cui la nuova meccanica dei quanti acquista la piena coscienza di avere solide fondamenta.

È dunque evidente che la comunicazione rilevante della scienza non si esaurisce in quella formale scritta, ma si articola anche nella comunicazione orale (congressi, conferenze) e nella comunicazione informale, scritta e orale.

In realtà a queste forme classiche di comunicazione della scienza, oggi dovremmo aggiungere una nuova forma di comunicazione: quella elettronica, attraverso la rete mondiale di computer. Internet non è solo un nuovo medium, un nuovo strumento di comunicazione, ma è un mezzo che determina una nuova qualità aggiuntiva di comunicazione [9].

Finora abbiamo dato per scontato che la comunicazione della scienza, o almeno la comunicazione rilevante della scienza, sia comunicazione tra scienziati. Dando per scontato che quello della scienza sia un mondo chiuso, autonomo, autoconsistente e autoreferenziale.

Questa è una visione ideale della scienza, visione che non ha mai avuto, storicamente, un riscontro reale. Gli scienziati sono cittadini del mondo. Che interagiscono col mondo anche quando lavorano. Vi sono canali svariati e bidirezionali attraverso cui la scienza e la società comunicano e si influenzano reciprocamente. Questi canali costituiscono robusti rami comunicativi che emergono dal tronco della istituzione sociale fondamentale dell'attività scientifica, il sistema di comunicazione della scienza.

Per lo sviluppo della scienza i vari rami della sua comunicazione al grande pubblico dei non esperti non sono meno rilevanti di quelli che si rivolgono al ristretto pubblico dei colleghi esperti. Perché, come il fisico francese Jean Marc Lévy-Leblond ha ben testimoniato, attraverso questo tipo di comunicazione lo scienziato mira alla diffusione e al riconoscimento sociale del suo sapere [10].

Se questo è vero, come crediamo che sia, dobbiamo rendere ancora più articolata e complessa la mappa della comunicazione della scienza. La

|         | Comunicazione formale              | Comunicazione informale   | Comunicazione pubblica                                       |
|---------|------------------------------------|---|--|
| Scritta | Letteratura primaria<br>secondaria | Lettere, quaderni di laboratorio<br>di laboratorio                | Divulgazione<br>(libri, giornali)                            |
| Orale   | Congressi, conferenze              | Discussioni in laboratorio<br>o 'al bar'                          | Insegnamento,<br>conferenze, radio, TV                       |
| e-comm  | Riviste in rete                    | e-mail, scambio di dati<br>e informazioni via Internet, chat line | Divulgazione in rete, e-mail, chat line<br>e-mail, chat line |

**Figura 1:** La comunicazione della scienza

tabella di Fig. 1 ci offre un panorama esauriente di questa fondamentale istituzione sociale.

Da notare che l'inserimento della colonna relativa alla comunicazione pubblica modifica qualitativamente la mappa della comunicazione della scienza. Perché amplia il numero dei soggetti che fanno comunicazione rilevante. In questa tabella, infatti, non vanno inclusi solo gli scienziati che comunicano il loro sapere attraverso l'insegnamento o la divulgazione, ma anche comunicatori che non sono scienziati, come giornalisti, insegnanti, presentatori radio e TV, membri di organizzazioni culturali e/o politiche e che, tuttavia, hanno un ruolo non trascurabile nella diffusione e nella accettabilità sociale della scienza.

## Scienza accademica e post-accademica

Il mondo scientifico che abbiamo delineato e la mappa della comunicazione della scienza che abbiamo provato ad abbozzare hanno tuttavia un grave limite: si riferiscono a un'era ormai superata dell'evoluzione della scienza. L'era in cui la scienza si poteva considerare, almeno in parte, un universo chiuso (nel senso di una dimensione sociale separata, autonoma e autoreferenziale). In quell'era la ricerca veniva effettuata da singoli scienziati o da piccoli gruppi di scienziati. Le decisioni relative alle piste di ricerca da battere erano prese all'interno delle comunità scientifiche (Università, Enti di ricerca). Gli obiettivi della ricerca erano definiti essenzialmente in base alle aspettative degli autori o, comunque, a quelle della comunità scientifica di riferimento.

L'era accademica della scienza ha iniziato a tramontare oltre cinquant'anni fa, intorno alla Seconda Guerra Mondiale. Nel dopoguerra l'organizzazione sociale della scienza ha iniziato a

modificarsi profondamente. L'attività di ricerca è sempre più divenuta opera di gruppi allargati, molto spesso composti da membri di varie nazioni. Spesso questi gruppi sono composti da decine, talvolta da centinaia, in qualche caso da un migliaio di scienziati che lavorano in modo coordinato, utilizzando macchine che richiedono spesso grandi quantità di soldi e di tempo per essere costruite (*Big Science*). Questi gruppi di scienziati interagiscono in modo fitto e sistematico con il mondo dell'industria e con il mondo politico per finanziare i loro progetti di ricerca. Gli obiettivi della ricerca sono, sempre più, delineati non solo sulla base delle aspettative della comunità scientifica, ma sempre più spesso sulla base delle aspettative dell'intera società. D'altra parte, gli effetti della ricerca hanno sempre più spesso ricadute immediate, notevoli e complesse (si pensi alla ricerca nucleare o alle moderne biotecnologie). Quindi sono discusse, accettate o rifiutate dalla società dopo ampi e, spesso, aspri dibattiti.

Insomma, il mondo della scienza e il resto della società sono sempre meno mondi autonomi, sia pure dialoganti, e sempre più mondi interpenetrati. In questa nuova era della scienza che John Ziman ha definito "post-accademica", i rapporti degli scienziati con l'articolato pubblico dei non esperti sono aumentati non solo in quantità, ma si sono anche modificati nella qualità [2, 11]. Sono diventati più ambigui, meno netti. I non esperti partecipano sempre più alle decisioni rilevanti che attengono al lavoro degli esperti.

## La comunicazione nell'era post-accademica della scienza

L'evoluzione dall'era accademica all'era post-accademica della scienza sta comportando una

evoluzione non meno radicale nel sistema di comunicazione.

Il sistema della comunicazione formale da qualche tempo vacilla. Da più parti vengono messi in discussione i protocolli della *peer-review*.

Al sistema della comunicazione informale, al contrario, viene riconosciuto un ruolo sempre più importante. Tanto che aumenta la richiesta di istituzionalizzare in qualche modo la comunicazione informale. Grandi organizzazioni scientifiche, per esempio, stanno facendo nascere luoghi ove è possibile rendere noti direttamente, in tempo reale, i risultati della ricerca e discuterli senza passare attraverso le procedure della *peer-review* (gli *open archives*). Sono luoghi, questi, in cui di fatto viene istituzionalizzata la comunicazione informale della scienza.

Ma il salto di qualità maggiore prodotto nella comunicazione della scienza dalla transizione nell'era post-accademica riguarda la comunicazione pubblica, ovvero la comunicazione al pubblico dei non esperti. Nell'era accademica questa comunicazione era sostanzialmente facoltativa. Vi erano scienziati che si ponevano il problema della diffusione del sapere scientifico e comunicavano al pubblico dei non esperti, essenzialmente attraverso libri, articoli e conferenze di divulgazione. Ma lo facevano su base volontaria. Sulla spinta di esigenze personali. Così per un Albert Einstein che sentiva il bisogno di divulgare i difficili concetti della relatività, c'era un Paul Dirac che teorizzava l'opportunità di stare alla larga dai giornalisti.

Insomma, nell'era accademica la comunicazione al pubblico dei non esperti era per lo scienziato una sorta di missione personale, non un'esigenza sociale. Infatti, la gran parte degli scienziati, seguendo nei fatti l'invito di Paul Dirac, non faceva comunicazione pubblica.

Nell'era post-accademica della scienza, la comunicazione dello scienziato coi vari pubblici dei non esperti è diventata un'esigenza inderogabile; una necessità sociale.

Lo scienziato deve, nella pratica quotidiana della sua attività, comunicare con una vasta gamma di interlocutori non esperti: dal politico nazionale, al burocrate di Bruxelles, al manager della multinazionale interessata a finanziare la sua ricerca, ai cittadini tutti.

Alcuni anni fa i rappresentanti dei fisici inglesi

delle alte energie restarono sorpresi dalla perentoria richiesta del Ministro della Ricerca Scientifica di Sua Maestà: spiegatemi in una paginetta di trenta righe perché il contribuente britannico deve investire una parte cospicua delle sue risorse nella ricerca del bosone di Higgs.

Alcuni mesi dopo i biologi svizzeri si sono dovuti trasformare in appassionati e convincenti militanti politici, con tanto di manifestazioni di piazza, per vincere un referendum in cui la posta in gioco era la possibilità stessa di continuare a fare ricerca nel settore delle moderne biotecnologie.

Né i fisici inglesi delle alte energie, né i biologi svizzeri, avevano molta scelta. Non potevano in alcun modo sottrarsi alla sfida della comunicazione. Non lo hanno fatto. Per inciso, i fisici inglesi delle alte energie hanno sostanzialmente perso la loro sfida. Ai biologi svizzeri è andata meglio: hanno vinto il referendum.

Questi esempi clamorosi dimostrano che la comunicazione al pubblico dei non esperti nell'era post-accademica della scienza è diventata una necessità. Una parte, non banale, del lavoro dello scienziato. Di conseguenza, lo scienziato ha il dovere professionale non solo di comunicare al grande pubblico dei non esperti ma di conoscere i meccanismi e di acquisire le tecniche della comunicazione di massa.

A questo dovere lo scienziato non sempre adempie. È molto probabile che quando anche la transizione psicologica dall'era accademica all'era post-accademica si sarà finalmente compiuta, le attitudini comunicative degli scienziati si modificheranno.

Nella nuova era post-accademica della scienza, tuttavia, il flusso della comunicazione tra comunità scientifica e società è più che mai bidirezionale. La società, nelle sue diverse articolazioni (politica, economica, culturale) comunica le sue aspettative alla comunità scientifica. Lo ha fatto il Ministro inglese coi fisici delle alte energie, lo hanno fatto i cittadini in Svizzera partecipando al referendum e al dibattito referendario. Lo hanno fatto tutti per necessità non per mera curiosità.

Bene, se la comunicazione della scienza da parte dei non esperti verso gli esperti è diventata un bisogno sociale diffuso, allora anche i non esperti hanno dei doveri. Il dovere di acquisire il massimo di conoscenze in merito ai problemi scientifici

che sono obbligati a dibattere e a risolvere.

Questo dovere è, in realtà, un diritto. Un diritto democratico fondamentale. Perché la scienza, lo ha dimostrato in tutto il Novecento, ha la capacità di incidere e modificare in profondità non solo la nostra vita quotidiana, ma anche la percezione che abbiamo dell'universo che ci circonda e di noi stessi.

La società deve quindi attrezzarsi perché i cittadini siano messi in condizione di soddisfare questo loro diritto / dovere democratico fondamentale. I mezzi per costruire un sistema soddisfacente di comunicazione pubblica della scienza sono ancora da trovare. Probabilmente passano anche attraverso una figura nuova di comunicatore di massa. Con una forte competenza tecnica, ma anche con una marcata capacità critica. Un comunicatore di massa capace non solo di comprendere i contenuti tecnici di un lavoro scientifico. Ma anche di inquadrarlo nel giusto contesto storico, filosofico, etico e sociale.

Se, come e dove formare questo tipo di comunicatore di massa è, ahinoi, questione ancora aperta. Ma ancora più aperta è la ricerca su un nuovo linguaggio della comunicazione scientifica, che io qui identifico con quello della interdisciplinarietà che emerge dallo studio di un sistema complesso che mette in relazione bidirezionale le comunità scientifiche tra di loro e coi vari pubblici di non esperti. La ricerca di questo nuovo linguaggio ha tre principali direzioni:

- la dimensione sociologica, che studia l'evoluzione del modo di lavorare e di comunicare degli scienziati e al tempo stesso l'evoluzione del rapporto tra scienza e società;
- la dimensione storico-filosofica, che studia la dinamica temporale del processo di comunicazione;
- la dimensione artistico-letteraria, che studia i linguaggi utilizzati e ne sperimenta di nuovi.

Questo sistema complesso porta a superare il modello *top-down* del *Public Understanding of Science*, proprio dell'era accademica, in cui esistono, essenzialmente, due soli gruppi rappresentativi: gli scienziati e il pubblico indifferenziato dei non esperti. Il primo gruppo prende tutte le decisioni

rilevanti per lo sviluppo della scienza. Il secondo, fondamentalmente, nessuna. In questo contesto la modalità comunicativa è semplice: un gruppo (gli scienziati, il sapere) è la fonte esclusiva dell'informazione e quindi il protagonista attivo del processo di comunicazione, l'altro gruppo (il pubblico indifferenziato) è il recettore della comunicazione.

Nell'era post-accademica, invece, esistono molti pubblici che interagiscono e dialogano di scienza con le varie comunità scientifiche e tra di loro. Tra i molti pubblici si annoverano le autorità istituzionali; la burocrazia nazionale e internazionale; i manager dell'industria; i politici; i membri di organizzazioni non governative; gli operatori dei mass media; gli *opinion makers* (compresi gli accademici di formazione non scientifica); i diversi pubblici tecnici (medici, insegnanti, giudici, periti); il pubblico generico.

Per esempio, movimenti ambientalisti e istituzioni Parlamentari dialogano tra loro per stabilire le norme entro cui effettuare la ricerca biotecnologica. Oppure: gli *opinion makers* (religiosi, biotecnici) e grande pubblico dialogano tra loro per stabilire qual è la ricerca eticamente sostenibile nel campo della biologia umana.

In definitiva l'universo che concorre a prendere decisioni rilevanti per lo sviluppo della scienza non è un fiume che dalla vetta dei sapienti porta il sapere al mare degli inesperti, ma piuttosto un arcipelago ove tutte le isole sono interconnesse tra loro con ponti che altro non sono che le varie forme di comunicazione pubblica della scienza.

Ciascun ponte comunicativo tra due isole è bidirezionale ed è determinato da una serie di parametri di cui i principali sono:

obiettivi (per esempio, gli scienziati vorrebbero più fondi),

aspettative (gli scienziati si aspettano una risposta positiva dal pubblico con cui comunicano)

modelli di comunicazione.

Abbiamo a che fare quindi con una rete complessa, in cui ponti ed isole non sono determinati una volta per tutte, ma mutano le loro caratteristiche dinamicamente, e possono manifestare fenomeni emergenti, osservabili solo con una visione d'insieme e non localmente. Tra queste

caratteristiche è necessario considerare anche il carattere probabilistico dei ponti. Ciò deriva dal fatto che l'impresa scientifica si è sviluppata con un processo di costante allontanamento dal senso comune (più le scienze fisico matematiche, che quelle biologiche o sociali) e con il ricorso a un linguaggio preferenzialmente di tipo logico-formale lontano dal linguaggio comune. Tutto questo fa sì che nell'ambito della comunicazione della scienza valga una sorta di principio di indeterminazione: non posso esprimere un concetto scientifico, contemporaneamente, con il massimo della comunicabilità e il massimo del rigore. Se aumento la comunicabilità, perdo un po' di rigore, e viceversa.

Questo principio di indeterminazione è un vincolo formidabile alla comunicazione della scienza tra due qualsivoglia pubblici. È questo vincolo che rende la comunicazione pubblica della scienza non impossibile, ma sostanzialmente diversa da altri tipi di comunicazione pubblica.

Concludo, notando quanto sia lontana la valutazione del merito che l'ANVUR ha fatto e sta facendo [12] dal futuro della scienza, sempre più proiettato verso la interdisciplinarietà ed il confronto con la società. Una interdisciplinarietà necessaria come il padre del giornalismo scientifico italiano, Franco Pratico, osservò più di trent'anni fa:

“... una visione complessiva della topografia della conoscenza e delle connessioni che si stabiliscono tra i diversi campi della ricerca è indispensabile per colmare lo iato che continua a separare la percezione immediata, ingenua del mondo... dalle proposte e dai risultati della ricerca...” [13].

Un lavoro importantissimo, quello dell'ANVUR, ma che anch'esso, come la comunicazione scientifica, va maggiormente focalizzato sul mondo post-accademico, come il parallelismo delle valutazioni delle aree STEM con quelle letterario-artistiche mostra chiaramente [14]. La comunicazione scientifica è relegata nella valutazione ANVUR alla cosiddetta Terza Missione, non prendendo, io credo, nella giusta considerazione il fondamentale ruolo sia nell'alta formazione sia nella ricerca che il futuro le riserva. Si pensi soltanto al grande tema della sostenibilità che non

pù prescindere da un linguaggio interdisciplinare, così come dalla comunicazione scientifica stessa.



- [1] A. Pascolini: *Dai nuclei ai Quark: viaggio nell'infinitamente piccolo*, Arsenale Editrice, Milano (1990).
- [2] J. Ziman: *Essay on science and society*, Science, 282 (1998) 1813.
- [3] P. Greco: *Valorizzazione della divulgazione scientifico-naturalistica con riferimento all'educazione ambientale* in Memorie di Scienze Fisiche e Naturali, in Rendiconti della Accademia Nazionale delle Scienze detta dei XL, serie V, XXIII, parte II, tomo I;
- [4] S. Fantoni, P. Greco: *Innovazioni nella Comunicazione della Scienza*, in Il Modello Mediterraneo, CUEN, Napoli (2000).
- [5] A. Duro. *Vocabolario della lingua italiana*, Istituto della Enciclopedia Italiana, Roma (1994).
- [6] J. Ziman: *Il lavoro dello scienziato*, Laterza, Bari (1987).
- [7] M. Perutz: *Le molecole dei viventi*, Di Renzo, Roma (1998).
- [8] A. Pais: *Sottile è il signore...*, Bollati Boringhieri, Torino (1986).
- [9] P. Greco: *La scienza on-line circola come ai tempi di Galileo Galilei*, Telèma, Estate-Autunno (1999).
- [10] J. M. Lè vy-Leblond: *Il Big Bang? Non è un Grande Bum*, Sapere, Aprile (1995).
- [11] J. Ziman: *La Vera Scienza*, Dedalo, Bari (2002).
- [12] ANVUR, *Rapporto sul sistema della formazione superiore e della ricerca* (2023).
- [13] F. Pratico: *La cucina di Galileo*, Edizioni Theori, Roma-Napoli (1994).
- [14] A. Bonaccorsi, C. Daraio, S. Fantoni, V. Folli, M. Leonetti, G. Ruocco: *Do social sciences and humanities behave like life and hard sciences?*, Scientometrics, 112 (2017) 607.



**Stefano Fantoni:** è Presidente della Fondazione Internazionale Trieste per il progresso e la libertà delle scienze. Tra i tre massimi scienziati di nazionalità italiana nel campo della fisica nucleare teorica, ha ricoperto rilevanti incarichi nazionali e internazionali quali: Professore ordinario di Fisica Nucleare, Direttore della Scuola Superiore di Studi Avanzati - SISSA, Presidente dell' Agenzia Nazionale di Valutazione del sistema Universitario e della Ricerca - ANVUR, Champion dell'EuroScience Open Forum - ESOF2020,

Segretario Generale dell'International Union of Pure and Applied Physics – IUPAP, Presidente della Fondazione Internazionale Trieste per il progresso e la libertà delle scienze. Ha ricevuto i premi: Kalinga 2001 (UNESCO), Piazzano 2002, Pirelli International 2006, Capo D'Orlando 2007, Eugene Feenberg Memorial Medal 2007. Ha pubblicato quasi 300 articoli, ricevendo più di 10.500 citazioni con un impact factor  $H = 48$  ed un  $i10 - index = 114$ .

---

# Le modalità di comunicazione della scienza nelle biblioteche accademiche: passato, presente e futuro.

**Laura Viola**

*Dipartimento di Matematica & Fisica "Ennio De Giorgi", Università del Salento  
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sez. di Lecce, Lecce, Italy*

---

**U**na definizione dell'attuale ruolo e posizionamento delle Biblioteche accademiche nei processi di comunicazione scientifica non può prescindere da una riflessione attenta sulle profonde trasformazioni che hanno segnato i settori della conoscenza e le modalità di pubblicazione e trasmissione del sapere. Nel presente contesto, ci focalizzeremo sulle diverse modalità con cui le biblioteche (e nello specifico le biblioteche delle Istituzioni di ricerca) esplicano le attività di *science communication* e di *scientific literacy*, rivolte sia all'utenza accademica che alla cittadinanza e al territorio (con le attività di *terza missione* e di *citizen science*) e su come la loro evoluzione si sia modulata ai cambiamenti significativi intervenuti sia nell'infrastruttura della comunicazione scien-

tifica, sia nei principi e metodi di conduzione del lavoro scientifico e nella promozione e disseminazione dei risultati della ricerca.

## **Alle origini della trasmissione del pensiero.**

Per una migliore comprensione della funzione bibliotecaria dobbiamo seguirne, pur sinteticamente, l'evoluzione storica e partire dagli albori, risalendo all'atavico bisogno dell'uomo di esprimersi e al passaggio dalla forma orale, che già aveva consentito la codificazione del pensiero, all'uso di tratti grafici, che rendevano possibile preservare il codice indipendentemente dal parlante/ascoltatore ed assolvere all'esigenza pratica di razionalizzare e memorizzare il mondo circostante attraverso la riduzione delle cose a segni fissi e riconoscibili [1]. La scrittura, frutto della capacità dell'uomo di connettere idee

e concetti, è stata da secoli una delle principali modalità per rappresentare e tramettere il sapere, un veicolo privilegiato di comunicazione e di dialogo, strumento in tutto simile e parallelo alla memoria, di cui diviene una estensione, una stratificazione nel tempo [2]. Dai pittogrammi delle caverne di oltre 35.000 anni fa alle scritte ideografiche (i geroglifici) ai caratteri cuneiformi incisi nell'argilla della Mesopotamia del 4000 a.C., la scrittura si evolve e, con i Fenici, compare la scrittura alfabetica (il suo avvento in Italia è nel VII sec. a.C.).

La comparsa del libro, inteso come testo organizzato sul piano contenutistico e figlio dell'incontro felice tra staticità della forma e velocità del pensiero, segnerà l'arrivo dell'invenzione perfetta. Come disse Umberto Eco durante una conversazione con Jean-Claude Carrière

“Il libro è come il cucchiaino, il martello, la ruota, le forbici. Una volta che li hai inventati, non puoi fare di meglio.”

Un oggetto semplice ma di profonda complessità, dotato di enormi potenzialità, capace di innescare tanti processi cognitivi [3] e che vive solo con la lettura, altrimenti inerte e muto. Quali che siano stati nel tempo la forma fisica ed il supporto di scrittura (tavole di legno e argilla, tessuti di seta, papiri, pergamene, carta, tralasciando i supporti più primitivi come foglie, ossa, pietre ecc.), dal momento della sua comparsa nella storia ad oggi, il libro ha mantenuto integra la sua funzione fondamentale di *medium* e di potente simbolo di una cultura stratificatasi nel tempo, strumento di raccolta, espressione e trasmissione del pensiero, stimolo alla meditazione individuale e veicolo privilegiato di comunicazione culturale/scientifica. Esso riunisce in sé una duplice natura di:

- fonte e fatto storico,
- oggetto fisico e contenuto intellettuale,
- dimensione testuale (che rivive di continuo col processo di lettura e consente la trasmissione del pensiero nello spazio e nel tempo) e supporto fisico (portatore di informazioni sull'*humus* storico/culturale che lo ha generato).

Al bisogno innato di esprimersi si è al contempo associata l'esigenza, anch'essa connaturata all'attività intellettuale umana, di disporre di sistemi di classificazione e organizzazione delle conoscenze e, quindi, di una collocazione fisica delle registrazioni. È così che ha origine la Biblioteca.

## La nascita delle biblioteche: ruolo e funzioni.

Le biblioteche nascono, quindi, per esigenze pratiche di reperimento e di conservazione, come raccolte organizzate di documenti ordinati per essere reperiti, composte da pezzi autonomi senza alcun vincolo di sequenzialità e accostati insieme in modo del tutto volontario ed intenzionale. Si distinguono nettamente, quindi, dagli archivi, che hanno carattere inerziale e sono fondati sulla sedimentazione documentaria, nascendo con finalità pratiche e amministrative, per conservare la memoria storica e collettiva.

L'etimologia fa derivare il termine “biblioteca” dal greco βιβλιο –θήκη (composto di βιβλιον “libro” eθήκη “deposito”) ad indicare una raccolta di libri per uso di studio e anche il luogo fisico in cui sono conservati. Il grammatico romano Sesto Pompeo Festo (II sec. D.C.), nel suo compendio alfabetico in 20 libri della vasta opera lessicografica dell'erudito augusteo Marco Verrio Flacco, dal titolo “*De verborum significatione*” (fonte preziosa di notizie linguistiche ed antiquarie) scrive:

“Presso i Greci e presso di noi [Romani] con il termine biblioteca si indica sia un gran numero di libri sia il luogo in cui essi sono conservati”.

Ma una raccolta, in assenza di una mediazione catalografica, non è di per sé una biblioteca. Perché si realizzi l'incontro tra raccolte ed utente, è necessario quindi un *trait d'union*, un *medium* indispensabile, fondato su criteri rigorosi, coerenti e logici: il catalogo. Tramite il linguaggio catalografico, il bibliotecario esprime una parte vitale della propria identità professionale, mettendo in relazione positiva queste due entità, realizzando la comunicazione tra la ricchezza documentaria della biblioteca e le necessità di chi la utilizza [4].

Difficile, però, dare una definizione esaustiva di biblioteca. Possiamo riferirci, senz'altro, ad

un'organizzazione di risorse, processi e servizi integrati per documentare, conservare, mediare, diffondere, condividere la conoscenza registrata, ma anche ambiente in cui si sviluppano incessantemente dei contesti di senso, flussi di esperienze cognitive e di conoscenza, occasioni di apprendimento continuo e di cambiamento, luogo elettivo di relazioni tra persone. La qualità dell'agire organizzativo andrà poi a determinare il livello di legittimazione della biblioteca nel suo contesto e ne connoterà i valori fondanti e l'inevitabile dimensione etica (funzione sociale, rispetto delle libertà intellettuali, trasparenza ed imparzialità dei servizi, uguaglianza nel diritto di accesso alla conoscenza) [5].

Per tornare nell'alveo delle biblioteche accademiche, la loro *mission*, ieri come oggi, si consolida in questo ruolo di intermediazione e di guida dell'utente, facilitandone l'accesso ad un'informazione scientifica di qualità, con un servizio che dovrebbe essere il più possibile immediato, ampio, pertinente ed esaustivo. Tale supporto aiuta il ricercatore nel percorso di produzione e condivisione di nuovi risultati di ricerca, con conseguenti benefici di accrescimento della produttività ed innalzamento del *ranking* dell'istituzione [6].

Ma il loro ruolo non si limita a questo. Ospitando testimonianze di ambiti, periodi storici, lingue, provenienze differenti, le biblioteche tutte sono espressione di una società plurale: crocevia e fucina di culture, posizioni ed orientamenti diversi, sono sintesi e confronto nello spazio e nel tempo di saperi diversi, offrono diverse chiavi di lettura della realtà e vari strumenti per interpretarla, alimentando contaminazioni e percorsi interdisciplinari e divenendo portatrici non di rassicuranti certezze ma di dubbi fecondi [7].

Nei secoli la biblioteca ha assunto molteplici significati, legati al ruolo svolto nella società, all'intera trama di relazioni in cui ha operato, al modello organizzativo adottato e alle diverse modalità di conservazione del patrimonio. In ogni tempo, il suo profilo identitario sarà, comunque, specchio, espressione e testimonianza della civiltà di un'epoca e spesso unica fonte documentaria della sua cultura, memoria culturale e storica di un'intera comunità.

Per la pluralità di contesti in cui si collocano, le biblioteche sono al centro di un modello dina-

mico, che coniuga in sé più elementi:

- Biblioteconomia;
- Comunicazione interna ed esterna;
- Scienze cognitive;
- Teoria dei sistemi;
- Statistica;
- Sicurezza e *privacy*;
- Scienze dell'informazione.

Parlare di biblioteche significa riferirsi a dei sistemi complessi composti da un insieme di parti che, per un corretto funzionamento, devono integrarsi perfettamente tra loro, in forte connotazione dinamica:

- Materiali (le risorse documentarie);
- Attività (le pratiche di acquisizione, catalogazione, indicizzazione, informazione, conservazione e tutela);
- Funzioni (legate al soddisfacimento dei bisogni informativi dell'utente, anche virtuale e remoto).

Tante variabili (strutture, risorse umane, processi, prodotti, documenti) interagiscono funzionalmente tra loro per il raggiungimento degli obiettivi definiti dalla *mission* della biblioteca ed i servizi dovranno rispondere a tale logica sistemica, rimandando quei *feedback* sulla qualità che saranno determinanti per individuare e risolvere le criticità dei singoli processi.

## **Le Biblioteche: vocazione storica alla gestione dell'informazione.**

È un assunto ormai consolidato che nella società contemporanea l'accesso all'informazione e alla conoscenza abbia un ruolo strategico nella ricerca, nello sviluppo, nella pianificazione, nel processo decisionale, nella soluzione di problemi e nel processo di apprendimento, impattando positivamente sullo sviluppo economico, sociale e culturale delle persone e delle società. Non a caso l'informazione è al centro di nuove professioni. Già nel 1950 Norbert Wiener, il fondatore della cibernetica, sosteneva con grande intuizione che la qualità della vita sarebbe stata sempre più strettamente correlata con la capacità di controllare il processo informativo e i luoghi della formazione culturale (musei, laboratori, biblioteche, università) avrebbero dovuto adeguarsi a tali accresciute necessità della società, pena il

fallimento nel proprio intento [8]. Si comprende, pertanto, quanto sia importante la capacità di comprensione e gestione del ciclo di vita dell'informazione e quanto essenziale sia saper analizzare, archiviare, recuperare e comunicare l'informazione.

Ora, qual è il posizionamento delle Biblioteche in questo contesto? Storicamente esse, in quanto luoghi del sapere e dell'educazione, hanno sempre avuto un ruolo chiave nella gestione e comunicazione dell'informazione, essendo chiamate per loro stessa vocazione a:

- Gestire l'informazione comunicata (la massa enorme di informazione registrata su qualunque supporto, che chiamiamo documenti);
- Gestire l'informazione come riferimento (descrizione bibliografica ed indicizzazione);
- Facilitare l'accesso all'informazione e guidare l'utente al documento originale, attraverso il processo cognitivo dell'analisi documentaria, che interpreta concettualmente le informazioni per comunicarle.

Sono, quindi, un anello importante, strategico e strutturato, nel ciclo della comunicazione scientifica, che parte dallo scienziato-autore per arrivare all'utente-lettore (spesso scienziato-lettore).

Facciamo nostro, in questo contesto, l'assunto della scienza intesa come processo ciclico a carattere incrementale, definito da una sequenza di fasi tra loro correlate (dove la conoscenza scientifica consolidata influenza la fase successiva, stimolando nuova ricerca da cui nasce nuova conoscenza), per cui chiameremo "comunicazione scientifica" il flusso continuo di informazione (interno alla scienza) tramite il quale si realizza la trasmissione del sapere in seno alla comunità scientifica e tra le varie generazioni di scienziati (nei diversi *step* di produzione, condivisione, valutazione, diffusione e conservazione dei risultati dell'attività scientifica) [9]. Un ecosistema, quello della ricerca scientifica, fatto di molte variabili e in cui ci sono diversi attori, tutti interconnessi: le università che mettono a disposizione le infrastrutture per la ricerca; gli studiosi (docenti, ricercatori, dottori di ricerca impegnati nello

sviluppo di teorie ed esperimenti) con i prodotti che sono il risultato della propria ricerca; gli editori commerciali che li pubblicano (assicurando il controllo di qualità attraverso la selezione dei prodotti ed il processo di *peer review*) e li diffondono tramite la loro catena di distribuzione; i produttori di repertori e banche dati cui si deve l'indicizzazione delle pubblicazioni; le biblioteche che garantiscono l'accesso alle pubblicazioni e la loro conservazione nel tempo. Una criticità in qualunque punto del flusso comunicativo si ripercuote sull'intero sistema. Quindi, nel caso delle biblioteche, se il taglio dei *budget* non consente di incrementare adeguatamente le collezioni, la conseguenza diretta sarà un'inevitabile limitazione della comunicazione scientifica [10]. Questa problematica nello specifico si è abbattuta pesantemente negli anni sulle istituzioni bibliotecarie, rimaste a lungo imbrigliate nell'annoso problema della spirale dei prezzi dei periodici e ostaggio della posizione dominante dell'oligopolio internazionale del mercato editoriale e del suo modello di *business*, abilissimo a muoversi molto più rapidamente rispetto alle politiche istituzionali. Ed è apparso da subito fin troppo chiaro che non ci sarebbe stato (come sperato) alcun vantaggio economico nel passaggio al solo supporto elettronico, in quanto gli editori investono sull'editoria elettronica per accrescere i propri profitti.

## L'impatto dell'evoluzione tecnologica sulle modalità di comunicazione delle biblioteche

Il panorama prevalente del XX secolo ha visto le biblioteche accademiche calate in un contesto essenzialmente omogeneo e regolare, fedeli alla propria vocazione a supporto degli utenti, dei ricercatori e delle esigenze di didattica e di ricerca della propria istituzione: il bibliotecario ha operato modulando i servizi e l'offerta di contenuti alle esigenze dei corsi di studio e delle linee di ricerca attive, mentre i supporti ed i formati dell'informazione rimanevano pressoché immutati.

A partire dagli anni '80 si assiste, invece, ad un profondo rinnovamento delle Biblioteche accademiche investite dalla rapida evoluzione del-

le tecnologie dell'informazione, dall'avvento di Internet, delle procedure automatizzate che ne mutano radicalmente struttura e funzionamento e dagli sviluppi normativi, che hanno portato alla nascita dei Sistemi Bibliotecari di Ateneo e allo sviluppo della cooperazione, con l'affermazione degli accordi consortili tra più Atenei per la contrattazione e sottoscrizione delle risorse elettroniche [11]. Una vera rivoluzione, in cui, in virtù dello sviluppo tecnologico e della trasformazione digitale, le modalità di accesso all'informazione accademica e ai risultati della ricerca sono mutate repentinamente.

Internet è stata senz'altro una grande sfida per le Biblioteche, che ne hanno però saputo cogliere sia i benefici che il potenziale trasformativo, riconoscendone le opportunità e trasformandole in azioni strategiche [12]. Grazie ai *software* di gestione si è avuto un miglioramento in procedure e servizi, sono stati eliminati gli sprechi da lavoro duplicato, è stato possibile navigare negli archivi con sorprendente facilità, effettuando ricerche mirate sulle registrazioni tramite gli operatori booleani (AND, OR, NOT). Per le risorse documentarie si assiste al passaggio dal supporto cartaceo a quello elettronico con l'affermazione degli *e-journals*, considerata la quarta rivoluzione cognitiva, dopo la nascita del linguaggio, l'avvento della scrittura e l'invenzione della stampa [1]: un totale ribaltamento del modello culturale tradizionale, delle logiche di funzionamento e dei concetti di conservazione ed accesso ai documenti.

Un simile cambio di paradigma ha comportato una perdita di complessità ed una pericolosa tendenza al *do-it-yourself* e alla semplificazione, rischiando di rimettere in discussione la stessa sopravvivenza della biblioteca e facendo sembrare superfluo il suo ruolo e la sua valenza nei differenti stadi della mediazione informativa e documentale. Da una parte l'utente si è ritrovato in una situazione di grazia, potendo accedere con minimo sforzo, sempre ed ovunque, ad un'enorme quantità di contenuti disintermediati (grazie ai motori di ricerca), rischiando di non saper mettere in relazione tutti i frammenti di conoscenza recuperati nella rete; dall'altra le biblioteche si svuotano e cala drasticamente l'utilizzo fisico delle collezioni librerie e l'apprendimento situato, in quanto il ricercatore si sente in grado, per molti

aspetti, di condurre autonomamente a distanza il proprio lavoro di studio e di ricerca, senza visitare la biblioteca [13]. Banalmente si oscura o diviene quasi invisibile agli occhi del ricercatore il lavoro svolto dalle biblioteche per rendere tutte quelle risorse accessibili e ricercabili. Parimenti si assiste ad un sovvertimento dei canoni di lettura, studio ed apprendimento personale: prima la linearità del testo scritto imponeva di dedicare tempo alla concentrazione e riflessione, mentre nella realtà virtuale il passaggio continuo da un *medium* all'altro fa sì che il livello di attenzione sia altalenante e si verifichi un totale cambiamento nei processi di apprendimento e nei meccanismi cognitivi di comprensione del testo.

Intanto il baricentro si sposta sui bisogni dell'utente remoto/virtuale, che divengono prioritari rispetto a quelli dell'istituzione e cresce in modo esponenziale la quantità di ricerca così come il desiderio di una più ampia disseminazione dei risultati. Le biblioteche si adeguano incrementando l'offerta documentaria, resa immediatamente accessibile e disponibile su supporti digitali, mentre nuovi strumenti si affermano (come i *Discovery tool* ed i *Repositories* istituzionali). Le successive drastiche contrazioni di fondi e riduzioni dei *budgets* hanno costretto le università a rivedere il ventaglio delle risorse sottoscritte con tagli dolorosi, spingendo sempre più le istituzioni di ricerca verso reti di *partners*, positive alleanze a livello nazionale e l'adesione a trattative consortili con gli editori per la sottoscrizione di abbonamenti a pacchetti di riviste elettroniche, a condizioni contrattuali migliorative.

Nel III millennio le biblioteche, immerse nell'era della tecnologia digitale, continuano ad essere attraversate dal cambiamento che impatta profondamente sulle diverse forme di produzione della conoscenza e di partecipazione culturale. In una fase di eterno *work in progress*, lavorano di continuo per sincronizzarsi con l'avanzamento tecnologico, per migliorare i servizi agli utenti e per rimuovere ostacoli e barriere culturali. Le molteplici modalità di adattamento ed il differente grado di permeabilità al cambiamento hanno fatto sì che, in un universo ibrido e sfaccettato, in un ambiente multiforme in cui convivono componenti reali e virtuali, potesse verificarsi la compresenza di una pluralità di modelli di Biblioteca,

tutte impegnate in un processo *in fieri* di continua evoluzione e che si declinano con diverse definizioni.

- **Biblioteca cartacea:** è una biblioteca tradizionale, avulsa da ogni contesto, in cui è la carta il supporto prevalente dei documenti. Si basa sulle raccolte possedute localmente e può essere consultata solo nel luogo in cui è fisicamente presente.
- **Biblioteca informatizzata:** è quella che ha automatizzato tutte le sue procedure gestionali e basa la ricerca delle proprie raccolte sulle potenzialità del catalogo elettronico OPAC (Online Public Access Catalogue).
- **Biblioteca elettronica:** in alcuni casi definisce la biblioteca automatizzata, in altre indica una biblioteca che ha sostituito le raccolte cartacee con raccolte di documenti digitali.
- **Biblioteca virtuale:** definizione usata per indicare una collezione quasi illimitata di documenti collegati in rete, ma anche l'intera collezione di documenti esistente.
- **Biblioteca ibrida:** è la più diffusa e a metà strada tra la Biblioteca cartacea e la Biblioteca digitale, rendendo disponibili le raccolte locali ed esterne mediante l'OPAC e la consulenza personalizzata del bibliotecario che supporta in sede.
- **Biblioteca multimediale:** secondo una definizione tutta italiana, indica la diversità di supporti esistenti nelle collezioni di Biblioteca, organizzate secondo modelli tradizionali.
- **Biblioteca digitale:** è una raccolta strutturata di documenti prodotti fin dall'origine in formato digitale.

Indipendentemente dalla propria specifica fisionomia, a tutte le biblioteche le potenzialità e le sfide insite nell'evoluzione tecnologica hanno imposto un cambio di prospettiva, la necessità di affrontare il cambiamento e di gestirlo consapevolmente, per essere competitive e all'altezza della contemporaneità: nuovi strumenti di analisi e nuovi paradigmi organizzativi e concettuali, crescente apertura verso una dimensione di

condivisione ed un potenziamento dei servizi di DD-ILL (*Document Delivery* e *Inter Library Loan*) per assicurare copertura alle crescenti esigenze documentarie dei ricercatori, bersagliati da un vero e proprio *communication overload* (tanti sono i termini conosciuti al riguardo, come *information pollution*, *data smog*, *infostress*, etc.).

Sul fronte dell'attività di supporto, essendo la ricerca accademica un processo ormai completamente digitale nelle sue fasi, l'accesso all'informazione è diventato sempre più disintermediato, rimpiazzando la centralità delle collezioni con la centralità dell'utente remoto/virtuale. Si è posta, quindi, l'esigenza alle Biblioteche di trovare nuovi modi per orientarlo e per facilitarne la fruizione autonoma e consapevole di risorse e servizi (*tutorials*, sessioni formative personalizzate, *reference online*, guide, servizi come "*Ask a librarian*") [6]. La priorità è garantire l'accessibilità ai dati della ricerca corrente e alla storia della ricerca scientifica, ma anche l'implementazione di soluzioni affidabili per la conservazione e per l'archiviazione a lungo termine degli archivi digitali, la cui gestione è totalmente diversa dai materiali tradizionali [14].

## L'evoluzione parallela del ruolo dei professionisti dell'informazione: dal passato al futuro

La figura professionale del bibliotecario ha radici antiche e nasce con la Biblioteca di Alessandria, istituita sotto Tolomeo II Filadelfo (246 a.C.) pur se con funzioni più estese rispetto all'attuale accezione: infatti era a capo dei dotti, dirigeva le ricerche, esaminava i testi ed era anche precettore dell'erede al trono di Egitto. In linea generale, possiamo ormai affermare che nel III millennio siamo ben lontani dal *cliché* consolidato del bibliotecario come custode di un sapere polveroso, così come la biblioteca non è più il luogo della nostalgia e dell'odore della carta.

Il ruolo tradizionalmente svolto dal bibliotecario, tramite l'analisi concettuale ed il processo di validazione delle fonti, è stato quello di perno delle attività di mediazione informativa e documentale (cui si è affiancata quella di conservazione) tra il lettore e la conoscenza depositata in

biblioteca su supporti diversi [4]. Tali funzioni hanno subito un totale ribaltamento nel secolo scorso, quando nuove *missions* si sono imposte, sull'onda delle profonde trasformazioni intervenute nelle modalità di comunicazione scientifica e di disseminazione della conoscenza.

La migrazione massiccia dal cartaceo al digitale, l'orientamento verso l'*online sharing* e il bisogno di una rapida circolazione dei risultati della ricerca hanno condizionato le scelte ed i comportamenti dei ricercatori, bypassando le funzioni svolte dal bibliotecario di facilitatore dell'incontro tra idee registrate e utente, di analisi della domanda, selezione delle fonti, validazione dei documenti ed orientamento. Si è instaurato un circuito tossico di onnipotenza informativa e la facilità di reperimento di un'enorme quantità di conoscenza ha portato a prediligere un'informazione sporca, non mediata, a scapito dell'informazione pertinente, verificata e di qualità. Come efficacemente sottolineato in [15],

*"People in general tend to prefer easier methods to find information, and this mostly consists of "Googling" anything they need to learn or find. Although Google is helpful, it cannot compete with libraries in supporting their more complex, academic queries and requirements of the researchers. Libraries have a lot more to offer than a search engine. But this involves librarians adapting to the current situation and taking on newer roles to support their patrons and make them aware"*.

(*"In generale, la gente ha la tendenza a preferire i metodi più semplici per informarsi, e questo consiste principalmente nell'usare "Google" per ogni cosa di cui hanno bisogno di conoscere o trovare. Sebbene "Google" sia utile, non può competere con le biblioteche nel sostenere ricerche accademiche più complicate e richieste dei ricercatori. Le biblioteche hanno molto di più da offrire che un motore di ricerca. Ma questo implica bibliotecari che si adattino alla situazione attuale e che assumano nuovi ruoli per supportare i propri utenti e renderli consapevoli."*)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Traduzione del redattore

Più che mai, quindi, per l'utente disorientato resta essenziale il ruolo storico di supporto e di guida verso le fonti più autorevoli e pertinenti svolto dal personale bibliotecario e le sue *skills* di *critical thinking*, garanzia di stabilità documentaria e di selezione critica delle fonti. Ma questo ruolo da solo non può bastare.

Questi mediatori del sapere, dinanzi alla mole selvaggia di informazioni labili e mutevoli facilmente disponibili in un panorama digitale complesso ed articolato, sono stati chiamati a cambiare pelle e a rispondere ancora una volta alle sfide di una professione in continua evoluzione per stare al passo coi tempi di una società in rapida trasformazione, non a caso definita società cognitiva (*Knowledge society*), in cui la ricerca scientifica riveste un ruolo chiave su tutti i processi di innovazione che impattano sulla sfera economica, ambientale, politico-istituzionale, sociale, culturale [16]. Nella capacità di gestire il cambiamento, i bibliotecari si sono giocati una partita importante: chi non ha avuto paura di uscire dall'introversa *comfort zone* e di rinunciare ad una visione passivo-conservativa ha valorizzato in modo proattivo il proprio ruolo (spesso misconosciuto) di professionista dell'informazione, detentore di competenze fondamentali a supporto dell'utente, di capacità critiche e selettive, di metodo e rigore, di una preziosa esperienza sedimentata nel tempo e messa insieme con vocazione. La continua evoluzione negli scenari fa vivere loro a tutt'oggi un perenne percorso di crescita e di adeguamento delle competenze professionali, rendendoli *multitasking*. In quanto specialisti nell'organizzazione della conoscenza e nella mediazione informativa, devono giocare d'anticipo sulle esigenze degli utenti ed essere attenti sia ai bisogni culturali e ai ritmi di una sfera pubblica che muta di continuo sia a quelli del sapere nelle sue forme tradizionali. Svolgere bene il proprio ruolo, per i Bibliotecari del 21° secolo (era trasformativa con un ecosistema di ricerca scientifica basato sui *big data*) significa non potersi esimere dall'enorme responsabilità di reinventarsi ed evolvere nell'organizzazione delle attività e dei servizi, progettandone di nuovi che, affiancandosi a quelli tradizionali, meglio rispondano ai bisogni informativi non solo del contesto accademico ma anche del territorio: i servizi della *digital library*, lo sviluppo di model-

li di disseminazione *open access*, la formazione degli utenti al miglior utilizzo dei nuovi strumenti, la bibliometria, il *public engagement* e la terza missione.

Quindi, senza abdicare al ruolo storico di facilitatori dell'accesso alle risorse primarie e secondarie, dovranno garantire il supporto alla ricerca con approcci diversi, profilati sulle esigenze specifiche della comunità accademica. Restando nell'alveo della ricerca scientifica, in cui i ricercatori si trovano a dover gestire, organizzare e dare senso ad una crescente quantità di dati, possiamo senz'altro affermare che i bibliotecari, con la loro *expertise in knowledge management*, possono essere dei preziosi collaboratori di fronte a tali sfide e, se coinvolti nei gruppi di ricerca, fornire un importante supporto nella gestione, l'analisi, la validazione e la conservazione dei dati [17].

È, pertanto, confutabile il pregiudizio di quanti, dinanzi all' (apparente) onnipotenza dei motori di ricerca, ritengono superflue biblioteche e bibliotecari: certamente non solo sopravviveranno ma (come la loro storia insegna) sapranno ripetutamente affermarsi in mutati contesti e continuare la loro *educational mission* consapevoli e determinati, su una scala ormai più globale che locale, facendo del cambiamento una sfida stimolante e una nuova opportunità, sempre nella salvaguardia dei valori del proprio servizio. Non è, del resto, pensabile, in un contesto segnato da scenari mutevoli nel mondo della ricerca e da crescenti aspettative nei confronti delle realtà accademiche, poter rinunciare, dinanzi alle sfide del futuro, a un capitale di esperienza e conoscenze accumulate negli anni e all'apporto di istituti storici con fondamenta solide e radici profonde.

## Le modalità di comunicazione scientifica delle biblioteche accademiche

Ma quali sono gli strumenti e le modalità con cui la biblioteca accademica veicola l'informazione scientifica o ne supporta l'accesso? Lo fa con i servizi, con le risorse e con le *skills* del personale. Di seguito ci caleremo nei diversi modi con cui viene esplicata tale funzione.

- Il punto di partenza, in un *excursus* estremamente sintetico, non può che essere il catalogo,

strumento essenziale di mediazione tra le raccolte e gli utenti, con cui il patrimonio della biblioteca diventa visibile, conoscibile, recuperabile e, quindi, utilizzabile [18]. Siamo ormai abituati a definire OPAC (Online Public Access Catalogue) gli strumenti di ricerca nei cataloghi di biblioteca affermatasi con l'avvento dell'epoca dell'automazione; il termine trae origine dal primo catalogo online delle università dell'Ohio, probabilmente il primo catalogo online al mondo, realizzato nel 1971. Se ne può seguire la lunga evoluzione da semplici mezzi di *information retrieval* (che rendono possibili solo poche tipologie di ricerca, alla stregua dei cataloghi cartacei) a quelli di seconda (anni Ottanta), terza (anni Novanta) e quarta generazione (negli anni di Web 2.0 parliamo di NGC, *New Generation Catalogues*, e *Discovery tool*). Con questi ultimi, sempre più "Google-like", si sono avuti cambiamenti strutturali all'architettura dell'informazione fornita dai cataloghi: si tratta di portali specializzati per la ricerca bibliografica simultanea su collezioni eterogenee di risorse fisiche, elettroniche e digitali. Essi si sono trasformati da strumenti di ricerca federata (una singola ricerca può essere condotta contemporaneamente in più database e mostra i risultati in un'unica lista di riferimenti bibliografici) ad aggregatori di ricerca (occupandosi prevalentemente dell'interfaccia) per poi approdare a sistemi complessi di recupero dell'informazione, che permettono anche il collegamento diretto ai testi completi [19]. Con nuove importanti funzionalità (interfacce rinnovate, navigazione a faccette, *box* di ricerca singola, ordinamento dei risultati per rilevanza, suggerimenti come il "forse cercavi" con l'aggiunta di una logica probabilistica *fuzzy* a quella booleana, una più ricca visualizzazione dei dati, *link* permanenti, *feed* RSS), sono ottimi facilitatori per le risorse, in grado di offrire agli utenti un'esperienza di ricerca integrata ed efficiente. Ponendo l'enfasi sulla scoperta (*discovery*) piuttosto che sul reperimento (*retrieval*): parliamo, infatti, di D2D (*discovery to delivery*). Un esempio è "Summon", il *discovery tool* unificato, in uso presso l'Università del Salento, che va oltre la ricerca federata ed i cataloghi di nuova generazione e permette al ricercatore, attraverso un'unica maschera di ricerca l'accesso immediato ed affidabile ad un'ampia gamma di contenuti autorevoli classificati per ri-

levanza (in ogni tipologia di formato, digitale e cartaceo, audio e video, singoli articoli, *e-journals*, ecc.) senza necessità di eseguire ricerche su altre banche dati.

- Un'altra importante modalità di comunicazione dell'informazione scientifica utilizzata dalle biblioteche scientifiche è attraverso il ricco ventaglio di *databases* e risorse elettroniche messe a disposizione della comunità accademica dalle singole istituzioni di ricerca attraverso sottoscrizioni singole o consortili: *journals*, *e-books*, banche dati specialistiche, multidisciplinari, citazionali: per la comunità degli studiosi risorse imprescindibili da cui partire per produrre nuova ricerca e, quindi, nuova conoscenza.

- L'identificazione e l'ascolto dei bisogni sono alla base di ogni servizio di Biblioteca, pertanto l'erogazione dei Servizi di ILL-DD (InterLibrary Loan & Document Delivery), basati sugli scambi cooperativi e su positive e consolidate alleanze, permette di soddisfare le necessità documentarie della comunità accademica, garantendo il reperimento all'esterno del materiale bibliografico non posseduto localmente (monografie, articoli di rivista e capitoli di libro), tramite reti di collaborazione tra Biblioteche nazionali ed estere che, in reciprocità e prevalente gratuità, permettono la circolazione e condivisione dell'informazione. Con questa modalità la Biblioteca facilita l'accesso anche alle risorse non sottoscritte e non rientranti nella propria offerta documentaria.

- Un altro canale strategico con cui le istituzioni bibliotecarie supportano il corretto accesso all'informazione è attraverso gli strumenti di *Library instruction* ed i percorsi di *Information Literacy*. Partiamo innanzitutto, per una migliore comprensione, da cosa si intende per "*Information Literacy*", ricollegandoci alla definizione datane dall'UNESCO (Dichiarazione di Praga, 2003) come

"consapevolezza delle proprie esigenze personali e dei propri interessi, oltre alla capacità di identificare, localizzare, valutare, organizzare ed effettivamente creare, utilizzare e comunicare informazioni su determinate questioni o problemi; essa è un prerequisito indispensabile per partecipare effettivamente alla società dell'informazione e fa parte del diritto umano fundamenta-

le all'apprendimento lungo tutto l'arco della vita".

Si tratta di

"un continuum di abilità, comportamenti, approcci e valori che è così profondamente intrecciato con gli usi dell'informazione da essere un elemento fondamentale per l'apprendimento, lo studio e la ricerca: è la caratteristica che definisce lo studioso perspicace, il cittadino informato e giudizioso, e lo studente autonomo" (ANCIL Definition of Information Literacy, 2011).

La competenza informativa è, dunque, quel *set* di capacità integrate, quel *saper agire* che permette di risolvere i problemi connessi all'informazione in ogni ambito della vita personale (studio, lavoro, vita quotidiana, tempo libero, cittadinanza).

Fatta questa premessa, torniamo al nostro contesto per constatare che le biblioteche sono impegnate da sempre in percorsi di alfabetizzazione all'informazione e svolgono una funzione formativa molto qualificante (*user education*), non essendo solo un servizio meramente ancillare di supporto alla didattica e alla ricerca ma rappresentando una delle componenti del processo educativo svolto nelle istituzioni accademiche [20], un laboratorio in cui *learn to learn*, utilizzando contemporaneamente fonti primarie e secondarie, strumenti specialistici ed ausiliari. Le biblioteche esplicano tali funzioni attraverso una serie di indicazioni/pratiche/competenze/attività distintive a diversi livelli, sia programmate che estemporanee: si va da una serie di "istruzioni all'uso" di strumenti primari dell'informazione (portali, bibliografie, cataloghi, database, *discovery tool*) alla messa a disposizione di *brochures*, *tutorials*, guide, ai mini-corsi, a specifici percorsi di *reference* ed istruzione all'*information literacy* anche personalizzati.

Questo è uno dei valori fondanti della professione bibliotecaria: prendere in carico l'utente (ciascuno con un distinto bagaglio culturale di partenza, un suo livello di preparazione e proprie attitudini) ed aiutarlo a trovare un proprio "punto di vista" sull'universo dell'informazione (così dinamico, interattivo e pervasivo) per renderlo consapevole dei propri bisogni formativi,

renderlo capace di accedere ai contenuti, educandolo all'uso concreto delle tecnologie digitali, a valutare sia le risorse raggiunte sia i vantaggi e limiti dei diversi strumenti di ricerca. Imparando a documentarsi, a recuperare efficacemente l'informazione e a padroneggiare i diversi strumenti, l'utente-cittadino maturerà quel pensiero critico indispensabile per condurre una strategia di ricerca autonoma, per la selezione delle fonti affidabili nell'universo del Web e la valutazione dei contenuti informativi, per organizzarli e riformularli producendone responsabilmente di nuovi e, più in generale, per districarsi nell'infosfera da cittadino libero e consapevole che sa esercitare i diritti civili, politici, economici, sociali e culturali, per lo sviluppo e il benessere proprio e dell'intera società (come sostenuto nella Lyon Declaration lanciata dall'International Federation of Library Associations and Institutions in agosto 2014). Non ci addentreremo su argomenti correlati come il concetto di *digital literacy* o gli obiettivi dell'Agenda Digitale Italiana, limitandoci a sottolineare come tali competenze siano ritenute essenziali per la popolazione del Ventunesimo secolo ed è richiesto che siano fornite già a partire dalle biblioteche scolastiche. *L'information literacy* accademica avrà necessariamente uno spessore più complesso e, per supportare al meglio la comunità scientifica, dovrà adeguarsi all'evoluzione delle metodologie di ricerca a loro volta strettamente legate agli sviluppi tecnologici.

- Una modalità strategica con cui le biblioteche partecipano al processo di comunicazione della scienza è tramite il supporto alla pubblicazione in **Open Access**. La nascita del movimento internazionale dell'Open Access è stata senz'altro la novità più rilevante registrata all'inizio del nuovo millennio nel panorama della comunicazione scientifica e ha cambiato radicalmente il profilo del mondo accademico e delle Biblioteche di ricerca [21]. Opportuno, per comprenderne la valenza, soffermarsi un po' a ripercorrere i momenti costitutivi di questo movimento i cui prodromi risalgono al 1999 quando, con la Open Archives Initiative (OAI), si promuovono *standard* e *software* condivisi per garantire la comunicazione tra gli archivi grazie a strumenti tecnologici *open source*. La Conferenza di Budapest del 2001 dà all'OA il primo riconoscimento ufficiale in ambito

internazionale, confermato nel 2002 dalla Budapest Open Access Initiative (BOAI) che fornisce la prima definizione di "accesso aperto" ed individua le due vie dell'autoarchiviazione e della pubblicazione in riviste OA. Nell'ottobre 2003 si colloca, importantissima, la Berlin Declaration on Open access to Knowledge in the Sciences and Humanities: l'anno successivo la comunità accademica italiana farà ufficialmente il suo ingresso nell'Open Access con la Dichiarazione di Messina e successivamente con la Roadmap 2014-2018 (documento per il decennale della Dichiarazione di Messina). Ulteriore tappa dell'OA è Plan S, un'iniziativa di cOAlition S (il consorzio formato da 27 organizzazioni nazionali e internazionali di finanziamento della ricerca, con il sostegno della Commissione europea e di Science Europe), varata nel settembre 2018 e con l'intento di accelerare la transizione verso l'accesso aperto alle pubblicazioni di ricerca a partire dal 2021.

Il movimento OA è nato in ambiente accademico, figlio di una duplice spinta: da una parte il dilagare dell'era digitale che ha reso impellente la necessità di un accesso rapido e quanto mai ampio alla letteratura scientifica prodotta da ricercatori, studiosi e scienziati; dall'altra come efficace risposta all'incremento vertiginoso del costo degli abbonamenti (in 20 anni pari a 6-7 volte la crescita dell'inflazione [20]) e divenuti inaccessibili per la drastica contrazione dei *budget* delle Biblioteche. Qual è, del resto, il senso dell'agire della comunità scientifica? Essa si nutre della libera circolazione della conoscenza e non ha finalità commerciali. Più è alto il livello di disseminazione, maggiore è l'impatto, la visibilità per l'autore, il suo riconoscimento nella comunità internazionale, la possibilità di carriera e l'impulso alla crescita complessiva e diffusa della conoscenza. L'Open Access è nato con tale spirito: quale canale alternativo per assicurare una disseminazione globale a costo zero dei risultati delle ricerche condotte con finanziamenti pubblici e come ribaltamento delle storture del sistema editoriale tradizionale incentrato sul periodico scientifico quale prodotto commerciale. Un sistema involuto in cui un Ateneo arriva a pagare 4 volte la propria ricerca: paga lo stipendio del ricercatore, paga per finanziare la ricerca, paga l'abbonamento alla rivista su cui è pubblicato l'articolo ed infine paga i diritti di riutilizzo

dell'opera incautamente ceduti dal ricercatore all'editore. Così la comunicazione scientifica, tradizionalmente incentrata sulle riviste, viene ad essere snaturata, controllata al suo interno da un attore dominante (l'editore) le cui finalità commerciali sono del tutto difformi da quelle della comunità scientifica [22]. Invertire questo processo dispendioso è possibile grazie ad un sistema di diffusione dell'informazione efficace ed economico: l'OA, a sostegno di una scienza comunicata e compartecipata, declinata come diritto di accesso democratico sia alla produzione di informazione sia all'informazione corretta e di qualità.

E le biblioteche che ruolo hanno in tutto questo? Sono senza dubbio un fattore chiave nel processo di creazione e gestione dell'infrastruttura della scienza aperta, che ha dato un nuovo contorno alla comunicazione accademica, costringendo le biblioteche a confrontarsi con una nuova sfida, ridefinendo o espandendo ruoli e funzioni [23]. I principi fondanti dell'OA fanno leva, del resto, sul dovere connaturato in biblioteche e bibliotecari ad impegnarsi per creare un ambiente di libera circolazione della conoscenza e contenuti di qualità, riutilizzabili e condivisibili. Quindi li chiamano a svolgere un importante ruolo nell'espansione del movimento della *open science* e nell'affermazione dei nuovi modelli di comunicazione accademica, come alleati dei ricercatori, per migliorarne la visibilità e per supportarli con i servizi (individuazione di piattaforme editoriali *open*, comprensione delle politiche editoriali, conservazione e garanzia di accesso a lungo termine alle risorse tramite i *repository* istituzionali) [24].

- Un'altra importante modalità di comunicazione dell'informazione scientifica sono le procedure valutative dei prodotti della ricerca, che coinvolgono sempre più le competenze bibliometriche dei bibliotecari accademici e degli enti di ricerca. Ripercorriamo velocemente l'iter storico dell'attività valutativa, le cui radici (nell'attuale accezione) affondano alla metà degli anni Ottanta in Regno Unito, sotto il governo di Margaret Thatcher che istituì il RAE (Research Assessment Exercise, poi divenuto Research Excellence Framework) finalizzato ad una più efficiente distribuzione dei fondi sui centri di eccellenza della ricerca. Gli esordi dello strumento valutativo

compaiono, invece, già nel XVII secolo, quando, a seguito dell'invenzione della stampa a caratteri mobili, si ebbe un'impennata enorme della produzione editoriale, da cui scaturì l'iniziativa di alcune testate francesi e britanniche di stilare una lista di libri di qualità [25]. Il XVIII secolo segna, invece, il passaggio da una valutazione di tipo *ex-post* (successiva alla pubblicazione) ad una di tipo *ex-ante* (a essa precedente) con l'avvento della valutazione qualitativa dei pari (*peer review*), basata sulla revisione di esperti del settore [26] e che, fino alla metà degli anni Novanta del XX secolo, resterà la sola modalità di selezione della produzione editoriale scientifica di qualità. I suoi limiti, a tutt'oggi, sono la discrezionalità e l'eterogeneità di pratiche non standardizzate e, non a caso, già intorno agli anni Cinquanta si avverte l'esigenza di accostare a tale metodologia delle tecniche matematiche e statistiche mutuata dalla biblioteconomia e, nello specifico, dalla disciplina della bibliometria [27], prevedendo il ricorso ad indicatori numerici (o di prestazione, introdotti da Eugene Garfield) tesi a misurare l'impatto di un lavoro di ricerca sulle comunità scientifiche. Si avvia, quindi, la valutazione quantitativa con i principali indicatori bibliometrici citazionali (Impact Factor, H-index e sue varianti, Eigenfactor, SCImago Journal Rank, SNIP). Essa si basa sull'analisi citazionale dei contributi scientifici, nella convinzione che un autore molto citato sia un autore di qualità e che la citazione di un autore da parte di un suo pari sia il segnale di un riconoscimento positivo del suo lavoro, di validità e credito del suo operato.

Valutazione qualitativa e quantitativa sono, quindi, due metodologie complementari e non alternative che, in una corretta prassi di valutazione della performance scientifica, dovrebbero essere in equilibrio ma che non possono, comunque, essere considerate misure a garanzia di una oggettività assoluta, richiedendo sempre la necessità di un approccio multivalente in un contesto valutativo più di largo respiro. Non ci soffermeremo sulle tante variabili esterne che possono condizionare il comportamento citazionale o sui limiti dell'approccio bibliometrico e del rischio di una eccessiva semplificazione di una materia così complessa. Ci limiteremo ad osservare come, nel panorama digitale, si siano affacciate nuove interessanti prospettive per la valutazione

della ricerca scientifica, con indicatori alternativi a quelli citazionali, non bibliometrici, basati sul criterio dell'uso (come l'UF - Usage Factor incentrato sui *download* della versione elettronica di un articolo) e sull'analisi dei *link* (come il WIF - Web Impact Factor) oltre alle nuove potenziali metriche derivate dalle interazioni *social*.

Abbiamo detto che la bibliometria nasce proprio in ambito biblioteconomico, come disciplina al servizio delle politiche documentarie in biblioteca, come supporto per la selezione, l'acquisizione, l'accesso e l'uso delle collezioni bibliografiche, ma anche per la valutazione dell'obsolescenza delle raccolte e per le decisioni di scarto e/o conservazione del materiale. La gestione della biblioteca si avvale proficuamente dei dati oggettivi e scientifici dell'analisi bibliometrica per una ottimale pianificazione, per ottimizzare ed allocare al meglio le risorse strumentali, finanziarie e umane. I primi riferimenti all'importanza delle competenze statistiche nel lavoro quotidiano in biblioteca risalgono a Ranganathan, che per primo nel 1948 conia il termine di "*librametry*" riprendendo successivamente il concetto [28] che sarà poi ulteriormente sviluppato da Alan Pritchard [27], cui si deve l'introduzione e la definizione del termine *bibliometrics* nel 1969.

Ma torniamo ad esaminare in che modo si inseriscono i bibliotecari nel flusso della valutazione dei prodotti della ricerca scientifica.

Iniziamo col dire che da sempre per i bibliotecari le attività valutative sono una prassi consolidata, sia quando erogano servizi di *reference* o procedono a nuove acquisizioni sia nei processi di revisione delle collezioni o nel lancio di nuovi servizi ed iniziative [25]. Questi professionisti, esperti nell'organizzazione e gestione dell'informazione, hanno connaturato in sé e nel proprio ruolo il legame strettissimo tra ricerca e biblioteca dovendo, da una parte, valutare e selezionare la conoscenza pertinente per le esigenze dei propri utenti, dall'altra elaborarla e condividerla nella modalità più opportuna. Tali competenze possono essere messe a disposizione anche fuori dal contesto della biblioteca e trovare applicazione nei vari *step* dell'attività valutativa, per di più col valore aggiunto di potervi garantire, in quanto disinteressati, oggettività e distacco preziosi. La tendenza predominante, al momento, vede i bibliotecari accademici impegnati nella va-

lidazione dei prodotti della ricerca degli archivi istituzionali degli atenei, in quanto esperti di metriche di valutazione e di ciclo della ricerca. Ma il loro apporto potrebbe essere ben maggiore, ad esempio nello sviluppo di nuove metriche sganciate dall'analisi delle citazioni o nella struttura dei *repositories* o nella proposta di nuove modalità di disseminazione dei risultati della ricerca. Ad ogni modo, è ancora lungo il cammino perché a tale professione siano riconosciute anche in Italia quella considerazione ed autorevolezza di cui già beneficia in altri Paesi, come gli Stati Uniti.

• Infine, ma non ultimo per importanza, vi è il canale delle "Attività di terza missione" svolte dalle biblioteche accademiche, sempre più attive con iniziative di *public engagement*, di apertura e condivisione dei servizi al territorio e interazione con nuovi pubblici, ben oltre le esigenze delle singole comunità di ricerca e il bacino omogeneo e definito dei suoi utenti istituzionali. E non c'è da stupirsi, tenuto conto che l'università ha una funzione propulsiva della scienza e della cultura nella società, una vera missione per lo sviluppo sociale ed imprenditoriale del territorio. L'attività di comunicazione e diffusione della scienza delle biblioteche trae nuovo vigore ed efficacia incanalandosi attraverso eventi, mostre bibliografiche, presentazioni, progetti di alternanza con le scuole, visite guidate, laboratori sul libro, incontri con gli autori. *L'audience*, non più limitata all'ambiente accademico, si amplia a nuovi *stakeholders*: enti locali, scuole, archivi, associazioni civiche e professionali, insegnanti, musei, ecc. [29]. Le attività tradizionali a supporto della ricerca e della didattica si integrano con l'apertura al territorio, nell'ottica della crescita sociale, culturale ed economica della comunità. Tra comunità scientifica e cittadini la sinergia deve essere stretta, matura, osmotica e, del resto, viviamo in una società che partecipa sempre più attivamente all'assunzione di decisioni rilevanti per lo sviluppo della scienza il cui ruolo, nella nostra vita individuale e collettiva, è, a tutti i livelli (economico, sanitario, etico, ecologico) sempre più pervasivo [30]. Inoltre, la ricaduta sulla società delle innovazioni tecnologiche e della ricerca avviene ormai in tempi rapidissimi. Si comprende, pertanto, come la *mission* delle biblioteche (incluse quelle accademiche e di ri-

cerca) si ampli in modo esponenziale ben oltre i confini della comunità accademica, chiamando tali istituzioni della memoria ad un ruolo attivo e propositivo sul territorio, quale motore di sviluppo nella cittadinanza di un pensiero critico ed un pensiero scientifico. Fondamentale è il ruolo della biblioteca quale luogo di condivisione, strumento di coesione, integrazione sociale e condivisione libera e gratuita dei saperi in quanto beni comuni.

Questo nuovo profilo di biblioteca ci impone di riallacciarci a principi e funzioni di quella biblioteca pubblica proposta dal Manifesto UNESCO del 1949 (aggiornato nel 1994 e poi nel 2022) e ritenuta forza vitale per l'istruzione, la cultura e l'informazione, intesa come istituto al servizio del cittadino in cui si concretizza l'assioma etico secondo il quale ciascuno ha un identico diritto a coltivarsi e a progredire intellettualmente: dove è possibile un accesso libero e senza limitazioni alla conoscenza, al pensiero, alla cultura e all'informazione, senza distinzione di età, razza, sesso, religione, nazionalità, lingua o condizione sociale e dove le raccolte e i servizi non devono essere soggetti ad alcun tipo di censura ideologica, politica o religiosa. La biblioteca, quindi, è via di accesso locale alla conoscenza (che è un bene comune ed universale) e costituisce una condizione essenziale per l'apprendimento permanente, l'indipendenza nelle decisioni, lo sviluppo culturale dell'individuo e della comunità. Come scriveva Gaillard già nel 1903

“Le biblioteche non sono per singoli individui ma per l'intera comunità, ricchi e poveri, eruditi e ignoranti. Le biblioteche esistono per la comunità e per innalzare il livello civile dei cittadini” [31].

Attraverso le attività di terza missione, le biblioteche divengono, quindi, un canale strategico per veicolare in modo diretto la comunicazione scientifica sul territorio e favorire la costruzione di una cultura diffusa di *citizen science* che è elemento essenziale di una società democratica della conoscenza, per l'uguaglianza nelle opportunità, collimando con le finalità del pensiero scientifico moderno e l'ideale baconiano di una scienza capace di generare benefici non solo per alcuni, ma per l'intera umanità.

## Criticità e nodi da sciogliere

Gli attuali scenari in cui operano le biblioteche accademiche ed i professionisti dell'informazione rimandano un quadro di estrema complessità. Le dinamiche interne all'ecosistema della comunicazione scientifica e alle modalità di produzione, valutazione e disseminazione del sapere non sono scevre di criticità e contraddizioni, ponendo al settore della conoscenza sfide decisamente aperte.

Si constata che il movimento dell'Open Access non ha ancora completamente ribaltato le dinamiche della comunicazione scientifica, la transizione viaggia a rilento rispetto alle aspettative e scienziati/ricercatori non si sono del tutto affrancati dalla sudditanza e dai vincoli finanziari imposti dai colossi editoriali; inoltre si coglie come siano tante le perplessità sui modelli OA ibridi basati sul sistema delle Article Processing Charges.

Non si può sottovalutare neppure il profondo condizionamento esercitato dai produttori commerciali di banche dati citazionali sull'attività di valutazione e misurazione della ricerca scientifica svolta dalle agenzie nazionali. L'inclusione o meno di un prodotto tra i materiali da indicizzare in uno specifico *database* proprietario, così come i criteri di applicazione degli indicatori bibliometrici finiscono con l'orientare fatalmente le scelte dei ricercatori. Purtroppo è un dato di fatto che chi ha il controllo del sistema non è la comunità scientifica internazionale che produce la ricerca ma i grossi editori che da quella ricerca traggono profitto. Per di più, la prassi di misurazione dei prodotti scientifici scava un abisso incolmabile tra le discipline di area STEM e quelle di area socio-umanistica, creando un *gap* importante e alimentando uno squilibrio non accettabile [11].

Merita menzione, per il suo impatto negativo sul flusso della comunicazione scientifica e per la confusione ingenerata tra gli studiosi meno accorti, il triste fenomeno dei “*predatory publishers*, editori che, dietro rapido pagamento di una quota, accettano articoli con promessa di pubblicazione immediata, senza alcuna garanzia di qualità, nè *policies* di trasparenza o referaggio rigoroso, sfruttando i vantaggi del movimento Open Access per trarne profitto. Queste forme insane sono un colpo basso all'editoria OA auten-

tica basata su un processo editoriale controllato ed un *iter* accreditato di certificazione del valore scientifico che prevede una direzione scientifica, la presenza di un comitato di esperti, la selezione dei contenuti, la revisione tra pari.

## Conclusioni

Come superare queste discrepanze e quali potrebbero essere le soluzioni praticabili? Vogliamo credere in un salto evolutivo con cui presto la comunità scientifica globale, sulla base di principi oggettivi, affidabili e condivisi a livello internazionale, dia forma e contorno, con uno sforzo corale e unitario, ad un nuovo sistema comunicativo adattato ai bisogni della ricerca ed in grado di supportare adeguatamente i processi di misurazione e valutazione dei prodotti della ricerca finanziata con fondi pubblici, superando anche i limiti dell'attuale approccio bibliometrico ed aprendosi alla valutazione di nuovi indicatori. Ciò permetterebbe di sbrigliare le istituzioni accademiche da ogni condizionamento e dipendenza dagli oligopoli internazionali, rendendosi autonome ed in grado di operare le scelte più opportune per rinnovare consapevolmente l'intero sistema della comunicazione scientifica e della valutazione della ricerca.

A tal riguardo, fa ben sperare la presentazione, avvenuta a Roma il 5 aprile 2024, del Manifesto della scienza, promosso dalla Italian Scientists Association (che riunisce oltre 500 tra *top scientists* e professori universitari) e presentato alle istituzioni e ai decisori politici durante l'iniziativa "La Scienza al centro dello Stato" [32]. Il documento stimola ad un confronto interdisciplinare e ad un ponte comunicativo con le Istituzioni, rivendica il rigore del metodo scientifico (fondato su dubbio, confronto, evidenze, logiche deduttive), si focalizza sulla centralità ed integrità della scienza e sul dovere fondamentale, da parte della comunità scientifica, di essere inclusiva e di mettersi al servizio del Paese e di tutta la collettività, per favorire la *citizen science* e per offrire strumenti ed analisi utili a governare, insieme alla politica, le dinamiche di cambiamento, affrontando con consapevolezza e determinazione le grandi sfide globali dei nostri tempi, su temi complessi come salute, ambiente, sostenibilità, spazio, intelligenza artificiale, economia

circolare. Scienza e politica devono instaurare un dialogo aperto e continuo per stare al passo con la contemporaneità, in un connubio fecondo e costruttivo, nel rispetto della reciproca libertà ed autonomia costituzionalmente garantite e, soprattutto, di un sistema valoriale ed etico che le porti, ciascuna per il proprio ambito, a remare insieme per raggiungere responsabilmente i traguardi migliori per il benessere collettivo, rispondendo tempestivamente ad un'innovazione inarrestabile.

Particolarmente rilevante è la posizione che il Manifesto assume riguardo alla qualità della ricerca scientifica, da pesare non solo in relazione ai meri parametri numerici, ma rispetto alle qualità intellettuali e morali dei ricercatori; inoltre, pone la necessità di una riforma dei criteri di valutazione, che dovrebbero esaminare solo un ridotto numero di pubblicazioni del candidato, selezionate sulla base del rigore metodologico e del loro carattere originale ed innovativo, mentre, d'altro canto, si stigmatizza l'*unfair play* di chi fa ricorso ad eccessi citazionali o abusa di co-autoraggi.

Insomma, sembra delinearsi un cambio di passo verso condizioni migliorative di un sistema di valutazione e misurazione della ricerca che nel tempo ha svelato le sue crepe.

Interrogandoci, infine, su quale possa essere il posizionamento delle biblioteche, nel futuro contesto, le immagineremo ancora una volta come identità istituzionali aperte, non statiche, che creano e trasmettono contesti di senso, permeabili al cambiamento e alla complessità e proiettate verso nuove forme di scambi e di cooperazione, ma senza rinunciare alla vocazione storica di presidi culturali, di porta di accesso all'informazione in cui è garantita la qualità dei saperi, di facilitatori dell'incontro tra persone e contenuti selezionati ed organizzati. Nel panorama cognitivo di totale esposizione al caos informativo della rete, resta strategico e centrale il ruolo di chi, per il suo peculiare rapporto con la produzione scritta, è chiamato a dissipare le nebbie dell'*information pollution*, identificando e selezionando in modo rapido ed efficiente il materiale di qualità e rendendolo poi accessibile, disseminabile e riutilizzabile. Ma, nell'attuale contesto di marginalizzazione, è auspicabile che i bibliotecari possano svolgere un ruolo più incisivo nelle

dinamiche della vita accademica, ad efficace sostegno della ricerca, dei percorsi di valutazione, della qualità degli archivi istituzionali e nell'individuazione delle migliori strategie per l'accesso aperto alle pubblicazioni scientifiche.



- [1] S. Harnad: *Post-Gutenberg galaxy: the Fourth Revolution in the means of production of knowledge*, Public-Access Computer System Review, 2 (1991) 39.
- [2] G. Montecchi, F. Venuda: *Manuale di biblioteconomia*, Editrice Bibliografica, Milano (1995).
- [3] G. Solimine: *L'ultima lezione*, AIB Studi, 61 (2021) 523.
- [4] M. Guerrini: *Guida alla biblioteconomia*, Editrice Bibliografica, Milano (2008).
- [5] G. Di Domenico: *La biblioteca per progetti*, Editrice Bibliografica, Milano (2006).
- [6] C.V. Hollister, R. Schroeder: *The impact of library support on education faculty research productivity: An exploratory study*, Behavioral & Social Sciences Librarian, 34 (2015) 97.
- [7] G. Solimine: *La Biblioteca: scenari, culture, pratiche di servizio*, Laterza, Bari (2004).
- [8] N. Wiener: *The human use of human beings*, Eyre & Spottiswoode, London (1950).
- [9] V. Tonini: *Epistemologia dei sistemi e sinettica*, ISRDS-CNR (1974) 21.
- [10] A. M. Tamaro: *La comunicazione scientifica e il ruolo delle biblioteche*, Biblioteche oggi, 17 (1999) 78.
- [11] D. Ciccarello: *Biblioteche accademiche, comunicazione scientifica e valutazione della ricerca: nuovi ruoli e sfide per i Bibliotecari delle Università*, Biblioteche oggi Trends, 5 (2019) 55.
- [12] C. Basili: *La biblioteca in rete: strategie e servizi nella Società dell'informazione*, Editrice Bibliografica, Milano (1998).
- [13] C. Martell: *The absent user: physical use of academic library collections and services continues to decline 1995-2006*, Journal of Academic Librarianship, 34 (2008) 400.
- [14] A. M. Tamaro, V. Casarosa: *Research data management in the curriculum: An interdisciplinary approach*, Procedia Computer Science, 38 (2014) 138.
- [15] F. A. Fazal, R. Chakravarty: *Role of Library in Research Support: a Study of Bharathiar University*, Library Philosophy and Practice, (2019) 2780.
- [16] L. Lanzillo: *Scienza aperta, cittadinanza scientifica e terza missione dell'Università: il ruolo delle biblioteche accademiche*, Biblioteche oggi Trends, 6 (2020) 17.
- [17] L. Federer: *Research data management in the age of big data: roles and opportunities for librarians*, Information Services & Use, 36 (2016) 35.
- [18] A. Marchitelli: *Il catalogo connesso*, Biblioteche oggi, 32 (2014) 5,6.
- [19] A. Trombone: *Formare e gestire collezioni con i discovery tools: i Bibliotecari e la qualità dei dati nei sistemi di ricerca bibliografica*, Biblioteche oggi, 37 (2019) 2, 12.
- [20] G. Solimine: *The role of libraries and transformations in scientific communication*, Lettera Matematica International Edition, 1 (2014) 187.
- [21] M. Guerrini: *La filosofia open: paradigma del sistema contemporaneo*, Biblioteche oggi, 35 (2017) 3,12.
- [22] C. Basili: *Politica dell'informazione scientifica in Italia: una prima analisi delle variabili del processo della comunicazione scientifica AIDAInformazioni*, Anno 20 (2002), 48
- [23] L. Liu, W. Liu: *The engagement of academic libraries in open science: a systematic review*, The Journal of Academic Librarianship, 49 (2023) 102711.
- [24] I. Alam: *Changing role of academic librarians in open access environment*, International Research: Journal of Library and Information Science, 4 (2014) 452.
- [25] L. Lanzillo: *Bibliotecari, bibliometria e valutazione della ricerca: riscoprire una competenza e valorizzare una professione*, AIB Studi, 54 (2014) 51.
- [26] D. A. Kronick: *Peer review in the 18th century scientific journalism*, Journal of the American medical association, 263 (1990) 1321.
- [27] A. Pritchard: *Statistical bibliography or bibliometrics*, Journal of documentation, 25 (1969) 348.
- [28] S. R. Ranganathan: *Librametry and its scope*, International journal of scientometrics and informetrics, 1 (1995) 15.
- [29] M. Cassella: *La Terza missione dell'università: cos'è, come si valuta (con un'appendice sulle biblioteche)*, Biblioteche oggi Trends, 3 (2017) 59.
- [30] P. Greco: *La cittadinanza scientifica*, Micron, Anno V (2008) 6.
- [31] E. W. Gaillard: *Public Libraries: problems of their management – Mr Gaillard's views and Miss Haines's*, New York times Review, January 31, Section BR (1903) 6.
- [32] <https://www.isa2020.eu/docs/Manifesto-Scienza-ISA.pdf>



**Laura Viola:** è Responsabile della Biblioteca Dipartimentale Aggregata di Matematica e Fisica dell'Università del Salento, dove lavora dal 1989. Laureata in Lingue e Letterature Straniere nel 1987, ha conseguito un Master in Gestione e Direzione di Biblioteca, un Master in Archivistica e Biblioteconomia e una Specializzazione biennale in Didattica delle Lingue Straniere moderne.



---

# Il sogno di una biblioteca digitale di matematica

*In light of mathematicians' reliance on their discipline's rich published heritage and the key role of mathematics in enabling other scientific disciplines, the Digital Mathematics Library strives to make the entirety of past mathematics scholarship available online, at reasonable cost, in the form of an authoritative and enduring digital collection, developed and curated by a network of institutions.*

— **Vision statement, Cornell University DML Project, 2003-2004 [5]**

**Vittorio Coti Zelati**

Dipartimento di Matematica Pura e Applicata "R. Caccioppoli",  
Università di Napoli "Federico II", via Cintia, M.S. Angelo, 80126 Napoli (NA), Italy

---

## Introduzione

I risultati matematici non invecchiano e le teorie matematiche non vengono rimpiazzate ma servono da trampolini da cui raggiungere nuovi traguardi, da strumenti per nuove applicazioni in altre scienze e per lo sviluppo di nuove tecnologie. La parte fondamentale del *corpus* delle conoscenze matematiche è costituita dalle opere a stampa, in particolare su rivista, che sono state sottoposte al vaglio della comunità (revisione tra pari) prima della pubblicazione.

Le prime riviste scientifiche sono apparse nella seconda metà del 1600 (*Journal des sçavans, Philosophical transactions*) e le prime riviste a stampa specializzate in matematica sono sorte nel 1800 (*Annales de mathématiques pures et appliquées* nel 1810 e, prima rivista italiana gli "Annali di Matematica Pura ed Applicata" nel 1850). Secondo [zbMATH open](#), la banca dati europea di riferimento per la matematica, gli articoli di matematica pubblicati nel 1880 sono stati 1451, 1832 nel 1920, 13445 nel 1960, 86742 nel 2000 e ben

133267 nel 2020. Agli articoli pubblicati su riviste si aggiungono, a partire dalla fine del XX secolo, numerosi altri testi, la cosiddetta letteratura grigia, cioè testi prodotti e pubblicati senza una preventiva revisione tra pari direttamente dagli autori o da istituzioni accademiche.

Da sempre il luogo deputato per conservare e accedere a tale *corpus* è la biblioteca, che è anche il principale strumento di lavoro di ogni matematico. I matematici ne hanno da sempre riconosciuto l'importanza occupandosi con particolare cura della loro gestione e dell'aggiornamento e della preservazione delle collezioni in esse contenute.

La comunità matematica si è anche sempre preoccupata di catalogare e rendere il più agevole possibile l'individuazione, in tale enorme quantità di pubblicazioni, dei risultati di interesse su un dato argomento. In tale direzione si sono mossi lo *Jahrbuch über die Fortschritte der Mathematik*, che dal 1868 fino al 1940 si è occupato di pubblicare recensioni di lavori matematici, a cui si aggiunge nel 1931 lo *Zentralblatt für Mathematik und ihre*

*Grenzgebiete* e nel 1940 il *Mathematical Reviews*, riviste queste ultime che hanno come scopo fin dalla loro origine quello di recensire tutta la letteratura matematica e che tutt'ora svolgono tale funzione, anche se non più in forma cartacea. Mi piace segnalare che anche in Italia il "Bollettino dell'UMI" aveva tra i propri scopi quello di pubblicare sunti di lavori italiani ed esteri (si veda il Programma dell'Unione Matematica Italiana [1]).

L'enorme crescita della letteratura scientifica ha reso però problematico, ed estremamente costoso, far sì che le biblioteche universitarie riescano ad assicurare la completezza delle collezioni ed ha richiesto lo sviluppo di nuovi modelli di condivisione dei testi prodotti. Alla consultazione in biblioteca si è aggiunto lo scambio diretto tra matematici delle ristampe degli articoli e successivamente la stampa e la diffusione sempre più capillare di pre-pubblicazioni. La possibilità poi di produzione di testi nativamente digitali, reso possibile dalla disponibilità di *personal computer* e il successivo avvento di "internet" e del "world wide web" alla fine del XX secolo ha trasformato la comunicazione in matematica in un modo confrontabile con quello dovuto alla nascita delle riviste specialistiche di matematica della fine del XIX secolo. Sono nati nuovi canali di comunicazione (*email*, messaggistiche di vario tipo) e sono sorti i primi depositi *online* di pubblicazioni matematiche in formato digitale, gestiti in proprio dai singoli matematici o da istituzioni.

Alcune date: *arXiv* nasce, per la matematica nel 1992, nel 1995 *JSTOR* digitalizza 6 riviste matematiche e più o meno nello stesso periodo *MathSciNet* e *zbMATH* passano dalla versione cartacea a quella elettronica. Ed iniziano a sorgere le prime riviste solo digitali (la prima rivista matematica esclusivamente digitale, il "New York Journal of Mathematics", vede la luce nel 1992). Agli inizi del XXI secolo la maggior parte delle case editrici pubblicano e distribuiscono, a fianco alla versione cartacea, una versione digitale delle stesse.

## La nascita dell'idea della biblioteca mondiale di matematica

È agli inizi degli anni 2000, con l'avvento di "internet" e del "world wide web" e grazie alla possibilità di gestire in modo semplice grandi quantità di dati in formato digitale che ha iniziato a circolare l'idea di una biblioteca digitale di matematica (*DML*, *digital mathematical library*, poi *WDML* per *world DML* e *GDML* per *global DML*). Nel 2002 la Cornell University Library ottiene un finanziamento dalla National Science Foundation

*"toward the establishment of a comprehensive, international, distributed collection of digital information and published knowledge in mathematics" [2].*

L'idea di una biblioteca mondiale di matematica prende spunto dai progetti che già dagli inizi del secolo si sono occupati di digitalizzare una parte significativa della letteratura matematica, in particolare segnaliamo il *Numdam* sviluppato da *Mathdoc* in Francia, il *Göttinger Digitalisierungszentrum* (*GDZ*) in Germania, *JSTOR* negli Stati Uniti, *Math-Net.ru* in Russia. I vari progetti, pur avendo l'obiettivo comune di rendere disponibile la letteratura matematica del passato più o meno remoto, hanno degli approcci assai diversi. Sia il *Numdam* che il *GDZ* forniscono accesso al testo completo degli articoli gratuitamente a tutti (eventualmente trascorso un certo periodo dalla pubblicazione, il cosiddetto "*moving wall*"), *JSTOR* ha un approccio più flessibile, e fornisce l'accesso a parte del materiale solo a pagamento. Il *Numdam* è poi caratterizzato da una grande ricchezza di metadati, si vedano ad esempio quelli relativi al seguente [articolo di De Giorgi](#).

Una descrizione della visione di una biblioteca digitale di matematica insieme ad una analisi della situazione agli inizi degli anni 2000 si trova negli articoli di Ewing e Jackson [3, 4].

Nella relazione finale del progetto della Cornell [2] si legge:

*"The DML is a collective effort of mathematicians, scholarly publishers, technical experts, and librarians to greatly broaden*

*access to the scientific and cultural heritage represented in published mathematics and to preserve it for the long term."*

Lo scopo ideale è quello di includere in questa biblioteca digitale tutta la letteratura matematica.

L'International Mathematical Union (IMU) viene individuata come naturale capofila della DML, e il progetto individua gli standard (minimi) a cui attenersi sia per la scansione dei testi che per la loro metadattazione. Vengono analizzati con attenzione anche i problemi relativi al diritto d'autore e a quelli relativi all'archiviazione e preservazione di tali archivi digitali. Viene affrontato anche il problema di come sia possibile sostenere economicamente l'iniziativa.

L'IMU ha istituito un'apposita commissione, il "Committee on Electronic Information and Communication" (CEIC) che si è attivamente occupato di promuovere iniziative volte a creare una biblioteca digitale di matematica, approvando nell'assemblea dell'IMU del 2006 un documento di appoggio al progetto che termina con l'affermazione

*"We can leave no better gift for future generations than a digital mathematical library of the past" [5].*

Nella stessa assemblea viene approvato un documento sugli standard tecnici suggeriti nella digitalizzazione [6]. Il progetto viene nuovamente discusso e approfondito in occasione del congresso mondiale dell'IMU in Corea nel 2014, dove viene organizzato un **panel dedicato alla WDML**.

## **Le iniziative italiane e la biblioteca matematica digitale europea**

In Italia le iniziative nel campo della digitalizzazione non mancano, ma sono diffuse sul territorio ed è assente un coordinamento nazionale come nel caso francese o tedesco. A seguito del progetto capeggiato dalla Cornell nel 2003 l'European Mathematica Society (EMS) prepara una richiesta di finanziamenti alla comunità europea che coinvolga le principali associazioni matematiche europee. L'Italia partecipa con un progetto

italiano denominato "italianDML". A tale progetto collaborano, oltre all'UMI, il sistema bibliotecario di ateneo (SIBA) di Lecce (attivo da tempo nel settore, sia collaborando con il Zentralblatt che con il Sistema Informativo Nazionale per la Matematica), il Giardino di Archimede, l'IMATI di Pavia, i sistemi bibliotecari di Padova e Torino. Purtroppo tale progetto non viene finanziato, e l'iniziativa italiana non prende piede.

In Italia sono comunque presenti vari progetti locali legati a singole riviste. Ne elenchiamo solo alcuni per illustrare la situazione

- Gli **Annali della Scuola Normale Superiore di Pisa - Classe di Scienze**, dal 2004 (con un *moving wall* di 5 anni);
- I **Rendiconti di Matematica e delle sue Applicazioni** di Roma, dal 1993 (mancano le annate dal 1940 al 1992);
- I **Rendiconti di Trieste**;
- **Le Matematiche** di Catania, dal 1986 (mancano le annate dal 1945).

Altre riviste italiane si appoggiano sul progetto Numdam:

- Gli **Annali della Scuola Normale Superiore di Pisa - Classe di Scienze**, fino al 2013;
- I **Rendiconti del Seminario Matematico della Università di Padova**

ed altre ancora vengono pubblicate da editori commerciali, e non sono di accesso libero:

- I **Rendiconti del Circolo Matematico di Palermo**;
- Gli **Annali di Matematica Pura e Applicata**.

Vi sono poi anche iniziative di tipo diverso, come l'**Edizione Nazionale Mathematica Italiana** "dedicata alla raccolta, condivisione e diffusione dei testi che hanno contribuito a costruire la cultura matematica del nostro Paese".

Un secondo progetto per la creazione di una biblioteca digitale di matematica viene finanziato dalla Comunità Europea nel 2010 ed ha portato alla realizzazione del progetto **EuDML**. EuDML è nell'idea dei suoi promotori, una prima approssimazione di una WDML e nasce nella speranza che altri progetti si aggregino così da farla

crescere, si vedano al tale proposito gli articoli [7, 8].

La nascita di EuDML stimola la nascita di un progetto italiano, frutto dalla collaborazione nel 2010 di SIMAI ed UMI con l'aiuto in fase di progettazione del SIBA di Lecce. È il progetto **biblioteca digitale di italiana di matematica** (bdim) che si pone come obiettivo quello di creare un polo di aggregazione nazionale e di diventare parte del progetto europeo EuDML. Con un finanziamento del Ministero dei Beni Culturali viene digitalizzata e messa in rete della serie 3 del Bollettino dell'Unione Matematica Italiana (BUMI). Successivamente la collezione si arricchisce della serie 8 e della serie 9 del BUMI (quest'ultima solo fino al 2013). Oltre al BUMI, sono ora *online* su "bdim" anche la Rivista dell'Unione Matematica Italiana e, grazie ad un finanziamento dell'Accademia dei Lincei, gli Atti Accademia Nazionale dei Lincei Classe di Scienze Fisiche Matematiche e Naturali dal 1962 al 2005. Il sito ospita anche una sezione dedicata alle tesi di dottorato e una sezione denominata "Grandi Matematici". "bdim" continua a crescere, anche se lentamente: è in corso la messa in rete del serie 1 del BUMI e altre aggiunte sono in programma.

Dal punto di vista tecnico "bdim" è stato realizzato con l'aiuto dei colleghi francesi del Numdam, e come per quel progetto si distingue per una particolare attenzione ai metadati, si veda per esempio l'**articolo di De Giorgi**. Si veda una presentazione del progetto in [9].

Il progetto è integrato in EuDML che fornisce al materiale in "bidm" visibilità e ne arricchisce i metadati all'interno di una piattaforma comune europea. Ad esempio l'articolo di De Giorgi su bdim è raggiungibile anche da EuDML: <https://eudml.org/doc/291278>. I sistemi comunicano tramite un server OAI-PMH e periodicamente EuDML scarica eventuali novità di "bdim".

Purtroppo sia il progetto europeo EuDML che, più in piccolo, "bdim" non sono finanziati in modo stabile e come conseguenza non crescono e si aggiornano con la necessaria velocità.

## Quale futuro per WDML?

Il sogno iniziale di una biblioteca digitale mondiale di matematica continua ad essere persegui-

to. Molto è stato fatto, ma c'è ancora strada da percorrere prima di arrivare alla meta. Segnalo qui le ultime novità e le principali iniziative in corso.

IL CEIC continua ad interessarsi e promuovere l'idea di una WDML: al congresso dell'IMU a Rio nel 2018 vi è stata una sessione dedicata [10] dove si è parlato dell'**International Mathematical Knowledge Trust** (IMKT) creato con il contributo della Sloan Foundation "as a step towards a global digital mathematics library". Il IMTK ha in programma un convegno per fare il punto sulla situazione questo autunno.

**Zentralblatt** – ora **zbMATH Open** – è diventato ad accesso libero e si è notevolmente arricchito. Include ora anche parte della letteratura grigia, in particolare quella pubblicata su "arXiv", si veda [11], il che permette spesso di risalire ad una versione del testo, purtroppo non sempre quella definitiva, di articoli pubblicati su riviste che non sono ad accesso aperto. zbMATH Open si occupa anche di fare uno *screening* costante del materiale da inserire, fatto utile in vista del numero crescente di riviste che non operano una rigorosa *peer-review*.

**Mathdoc** sta sviluppando un nuovo progetto denominato **Geodesic**: "*le plus court chemin vers l'article en libre accès*". L'idea è di fornire un metodo semplice per risalire al testo di un'opera matematica. Infatti molto materiale che si trova in rete non è sempre facilmente reperibile (basti pensare alla situazione delle riviste italiane sopra illustrata).

L'**European Mathematica Society** (EMS) ha da tempo creato il comitato **Publications and Electronic Dissemination** che si occupa di approfondire vari temi, in particolare quelli relativi a zbMATH (di cui l'EMS è l'editore insieme alla Heidelberg Academy of Sciences and Humanities e al FIZ Karlsruhe) e dello sviluppo e sostenibilità delle biblioteche digitali di matematica. Nel congresso dell'EMS di Siviglia nel 2024 vi sarà una sessione su *Mathematics in the Digital Age of Science* in cui si discuterà dello stato e degli sviluppi nelle infrastrutture digitali di supporto alla matematica.

Segnalo anche l'articolo di Ehsani e Teschke [12] in cui sono presentate interessanti analisi sulla quantità di testi disponibili ad accesso libero e discusse alcune delle problematiche connes-

se con la creazione di una WDML: il ruolo degli archivi aperti (il *green open access*), in particolare “arXiv”, il ruolo delle riviste “*golden open access*”, cioè quelle che addebitano all’autore i costi (gli *article processing charge APC*), la sostenibilità di quelle “*diamond open access*”, ovvero che non richiedono alcun contributo agli autori (di gran lunga le preferite dalla comunità matematica).

## Conclusioni

Grazie alla digitalizzazione della stampa scientifica, ed ai progetti di retro digitalizzazione, una parte sostanziale della letteratura matematica è ora in formato digitale, anche se ancora c’è da fare, basti pensare alle nostre riviste italiane. Tali documenti digitali sono in gran parte disponibili in rete, raggiungibile usando strumenti come zbMath Open e MathSciNet ma anche con i principali motori di ricerca. Purtroppo però non tutto è ad accesso libero e facilmente raggiungibile (idealmente da zbMATH o MathSciNet), come vorremmo fosse.

Alcune delle cose che la comunità può fare per far progredire la realizzazione di una WDML sono

- fare pressione sulle case editrici affinché tutti i testi siano disponibili ad accesso aperto, eventualmente dopo un ragionevole periodo di embargo (*moving wall*);
- favorire la pubblicazione su riviste ad accesso aperto;
- inserire la versione accettata (cioè la versione del proprio lavoro che include i suggerimenti dei revisori inviato alla casa editrice per la stampa) dei propri lavori su “arXiv” (o altro deposito ad accesso libero). Poiché zbMATH include nelle informazioni sull’articolo sia il link all’articolo pubblicato che a quello su “arXiv” l’effetto è quello di renderne disponibile a tutti il testo (anche se in forma tipograficamente differente da quello pubblicato sulla rivista);
- promuovere progetti di digitalizzazione di quanto ancora in forma analogica e di conservazione del patrimonio digitale.

- [1] UMI: *Il programma dell’unione matematica italiana*, Bollettino dell’Unione Matematica Italiana, 1 (1922) 1. [http://www.bdim.eu/item?id=BUMI\\_1922\\_1\\_1\\_0\\_1\\_0](http://www.bdim.eu/item?id=BUMI_1922_1_1_0_1_0).
- [2] Cornell University Library, *Digital Mathematics Library. Final Report*, 2004. [https://web.archive.org/web/20100619093334/http://www.library.cornell.edu:80/dmlib/DMLreport\\_final.pdf](https://web.archive.org/web/20100619093334/http://www.library.cornell.edu:80/dmlib/DMLreport_final.pdf)
- [3] J. Ewing: *Twenty Centuries of Mathematics: Digitizing and Disseminating the Past Mathematical Literature*, Notices Am. Math. Soc., 49 (2002) 771. <https://www.ams.org/journals/notices/200207/200207FullIssue.pdf>.
- [4] A. Jackson: *The digital mathematics library*, Notices Am. Math. Soc., 50 (2003) 918. <https://www.ams.org/journals/notices/200308/200308FullIssue.pdf>.
- [5] IMU:, *Digital mathematics library: A vision for the future*, Endorsed on August 20, 2006 at Santiago de Compostela by the General Assembly of the International Mathematical Union. [https://www.mathunion.org/fileadmin/CEIC/Publications/dml\\_vision.pdf](https://www.mathunion.org/fileadmin/CEIC/Publications/dml_vision.pdf).
- [6] IMU: *Some best practices for retrodigitization*, Endorsed on August 20, 2006 at Santiago de Compostela by the General Assembly of the International Mathematical Union. [https://www.mathunion.org/fileadmin/CEIC/Publications/retro\\_bestpractices.pdf](https://www.mathunion.org/fileadmin/CEIC/Publications/retro_bestpractices.pdf).
- [7] T. Bouche: *Introducing EuDML, the European Digital Mathematics Library*, Eur. Math. Soc. Newsl, 76 (2010) 11. <https://ems.press/content/serial-issue-files/13690>.
- [8] W. Sylwestrzak, J. Borbinha, T. Bouche, A. Nowiński, P. Sojka: *Eudml—towards the european digital mathematics library*, Towards a Digital Mathematics Library. Paris, France, July 7-8th, 2010, Masaryk University Press, 2010, p. 11. <http://eudml.org/doc/220786>.
- [9] V. Coti Zelati: *bdim: the italian digital mathematical library*, Towards a Digital Mathematics Library. Paris, France, July 7-8th, 2010, Masaryk University Press, 2010, p. 79. <http://eudml.org/doc/219991>.
- [10] P. D. F. Ion, T. Bouche, G. Misra, A. A. Onshuus, S. M. Watt, L. Zheng: *International Mathematical Knowledge Trust IMKT: an update on the global digital mathematics library*, Proceedings of the international congress of mathematicians, ICM 2018, Rio de Janeiro, Brazil, August 1–9, 2018. Volume I. Plenary lectures, Hackensack, NJ: World Scientific; Rio De Janeiro: Sociedade Brasileira De Matemática (SBM), 2018, p. 1157.
- [11] I. Beckenbach, K. Hulek, O. Teschke: *The extension of zbMATH Open by arXiv preprints*, Eur. Math. Soc. Mag.,

131 (2024) 54. <https://euromathsoc.org/magazine/articles/185>

- [12] D. Ehsani and O. Teschke: *On the road to a comprehensive open digital mathematics library*, Eur. Math. Soc. Newsl., 118 (2020) 76.  
<https://ems.press/journals/mag/articles/17387>.



**Vittorio Coti Zelati:** è professore di Analisi Matematica presso l'Università di Napoli Federico II. Si occupa di equazioni differenziali nonlineari, mediante metodi variazionali, topologici e teoria dei punti critici. Membro del comitato su "Publications and Electronic Dissemination" dell'EMS, è il coordinatore del progetto italiano di digitalizzazione "bdim" e membro dell'Executive Board dell'EuDML Initiative.

---

# L'editoria scientifica: un labirinto senza uscita?

**Marta Anguiano e Antonio M. Lallena**

*Departamento de Física Atómica, Molecular y Nuclear,  
Universidad de Granada, E-18071 Granada, Spagna  
Instituto de Investigación Biosanitaria (ibs.GRANADA),  
Complejo Hospitalario Universitario de  
Granada/Universidad de Granada, E-18016 Granada, Spagna*

---

**Q**uesto articolo presenta alcuni aneddoti relativi al processo di pubblicazione scientifica riguardanti autori, revisori ed editori, aneddoti nei quali siamo stati personalmente coinvolti. Cerchiamo di evidenziare il fatto che i problemi messi in evidenza, a nostro avviso, sono dovuti all'inflazione di articoli causata dalla quantificazione a cui ci ha portato da qualche anno l'uso quasi esclusivo degli indici bibliometrici nella valutazione dei curricula. Il nostro obiettivo è quello di promuovere la discussione sul tema e, pur non indicando possibili soluzioni, dato che purtroppo non le abbiamo, indichiamo alcune prime azioni che potrebbero riorientare la situazione.

## A titolo di introduzione

“Il revisore ha veramente letto il nostro articolo? Come è possibile che chieda una descrizione del metodo che abbiamo seguito per fare i calcoli, quando la sezione 2.1 è proprio dedicata a questo, e forniamo tutti i dettagli possibili e anche di più!”

**E**n este artículo se exponen algunas anécdotas relacionadas con el proceso de publicación científica que atañen a autores, revisores y editores y de las que hemos sido partícipes personalmente. Tratamos de resaltar el hecho de que, en nuestra opinión, son debidas a la inflación de artículos provocada por la cuantificación a la que el uso casi exclusivo de los índices bibliométricos en la evaluación curricular nos ha abocado desde hace ya algunos años. Nuestro objetivo es promover la discusión al respecto y, aunque no se indican posibles soluciones, dado que, por desgracia, no disponemos de ellas, se indican algunas acciones iniciales que podrían reconducir la situación.

## A modo de introducción

¿Se habrá leído este revisor, de verdad, nuestro artículo? ¿Cómo puede ser entonces que pregunte por una descripción del método que hemos seguido para hacer los cálculos? ¡Si la sección 2.1 está dedicada precisamente a ello y damos todos los detalles posibles y algunos más!

“Quante volte gli autori hanno rivisto il loro lavoro? Come possono dire le cose che dicono? Sembra che non sappiano nulla della metodologia che stanno applicando!”

¿Cuántas veces habrán revisado estos autores su trabajo? ¿Cómo es posible que digan estas cosas que dicen? ¡Parece como si no conocieran nada de la metodología que dicen estar aplicando!

Queste sono domande tipiche che lo stesso ricercatore può porsi di fronte al dualismo quasi schizofrenico autore/revisore a cui ci ha sottoposto l'attuale sistema di pubblicazione scientifica. Che questo sistema sembri esaurire la sua capacità operativa è uno dei commenti che di solito emergono ogni volta che ci incontriamo con diversi colleghi, davanti a un caffè o a una birra. Ma non sentiamo molte possibili soluzioni al crescente conflitto.

Un problema serio, a nostro avviso, è che quello che un tempo, non molto tempo fa, era il compito di una ristretta rappresentanza di ricercatori specializzati in un settore, ovvero la revisione dei manoscritti presentati per la pubblicazione su una rivista tradizionale, oggi è solo uno dei tanti compiti di quasi tutti i ricercatori. Una delle cause principali che hanno contribuito a questa situazione, se non la più importante, è stata la numerite che ha invaso i processi di valutazione dei ricercatori, in cui i criteri validi sono quelli bibliometrici, che stabiliscono l'eccellenza dei loro curricula sulla base del numero di pubblicazioni effettuate. Il numero di articoli ricevuti dalle riviste cresce e cresce, e poichè non sempre esistono buone idee per i lavori, si scopre che gli argomenti che si cerca di pubblicare sono, in troppe occasioni, semplici esercizi, questioni che appartengono allo sviluppo delle routine di lavoro stesse, o soluzioni note a problemi noti. Ricordiamo, ad esempio, un articolo pubblicato qualche anno fa su una rivista medica in cui l'autore spiegava le eccellenze del *linear fit*, che fu subito, e sorprendentemente, citato un buon numero di volte.

Ma non dobbiamo nemmeno sottovalutare, in questo vortice editoriale, il ruolo svolto dalle riviste *open access* in cui, al di là del fatto che cerchiamo di convincerci della serietà delle loro procedure di valutazione, ciò che prevale è la pubblicazione

Estas son preguntas típicas que un mismo investigador puede hacerse en virtud de la casi esquizofrénica dualidad autor/revisor a la que el sistema actual de publicación científica nos tiene sometidos. Que este sistema parece estar agotando su capacidad operativa es uno de los comentarios que usualmente surgen, a nada que nos reunimos con varios de nuestros colegas, con un café o una cerveza de por medio. Pero no se escuchan muchas posibles soluciones al creciente conflicto.

Un problema serio en nuestra opinión es que lo que hace un tiempo, no muy lejano, era el cometido de una selecta representación de investigadores especialistas en un campo, nos referimos a la revisión de los manuscritos enviados a publicar a una revista tradicional, es hoy día otra de tantas tareas de casi cualquier investigador. Una de las principales causas que han contribuido a esta situación, si no la más importante, ha sido la numeritis que ha invadido los procesos de evaluación de los investigadores, en los que los criterios válidos son los bibliométricos, que establecen la excelencia de sus curricula en base al número de publicaciones realizadas. La cantidad de artículos que reciben las revistas crece y crece sin parar y como las buenas ideas para los trabajos no siempre existen, resulta que los argumentos que se intentan publicar son, en demasiadas ocasiones, simples ejercicios, cuestiones que pertenecen al desarrollo de las propias rutinas del trabajo que se realiza, o soluciones conocidas a problemas bien conocidos. Recordemos, por ejemplo, un artículo publicado hace unos años en una revista médica en la que el autor explicaba las excelencias del “ajuste lineal”, contando al poco tiempo, y de manera sorprendente, con un buen número de citas.

Pero no hay que despreciar tampoco, en esta vorágine publicadora, el papel desempeñado por las revistas *open access* en las que, por mucho que traten de convencernos de la seriedad de sus procedimientos de evaluación, lo que prima es la

in cambio di una certa somma di denaro (spesso fuori dalla portata della maggior parte dei ricercatori). È molto curioso come, nella maggior parte delle occasioni in cui ci è stato chiesto di fare da revisori per una di queste riviste, la richiesta fosse accompagnata dallo stesso ritornello:

“per motivi di lavoro o di presentazione della tesi di dottorato, l'autore chiede che la revisione sia fatta il più rapidamente possibile”.

Ci è capitato di ricevere richieste di rapporto di revisione entro un breve periodo di due giorni... e di rifiutarle, sostenendo che il processo di revisione deve essere serio e che, per ovvie ragioni, sarebbe privo di tale serietà se avessimo accettato un periodo di tempo così breve. Sappiamo di un collega che ha usato un altro modo di rispondere: ha stilato una tabella di prezzi, che comprende il costo della revisione in base al numero di pagine del manoscritto e al tempo massimo per la revisione, che invia al direttore della rivista in risposta alla sua richiesta. Inutile dire che non riceve più alcuna richiesta di recensione.

La conseguenza di tutte queste assurdità è ovvia: non c'è la capacità di far fronte alla quantità di manoscritti inviati per la pubblicazione. E, poichè si presume anche che la revisione sia un lavoro gratuito, fatto per amore dell'arte, come parte del sistema editoriale che è salvaguardato dalla *peer review* (a proposito, un *business* più che lucrativo per le riviste *open access* che non hanno bisogno di impaginare il lavoro pubblicato perché lo fanno gli autori, non pagano i revisori e fanno pagare una tariffa salata agli autori), il risultato è che qualsiasi cittadino comune può diventare da un giorno all'altro un revisore esperto di quasi tutti i settori della conoscenza. È a questo punto che gli autori si pongono domande come quelle riportate all'inizio di questo articolo.

## Le difficoltà dell'autore

Nel nostro caso, dato che facciamo ricerca contemporaneamente sia in Fisica Nucleare che in Fisica Medica, possiamo dire che la natura ar-

publicación a cambio de una cierta cantidad de dinero (en muchas ocasiones fuera del alcance de la mayoría de los investigadores). Es muy curioso cómo en la mayor parte de las ocasiones que nos han pedido ejercer como revisores de una de estas revistas, la petición iba acompañada de la misma cantinela:

“por razones de trabajo o de presentación de la tesis doctoral, el autor solicita que la revisión se haga lo más rápido que sea posible”.

Solicitudes requiriéndonos el informe de revisión con un escaso plazo de dos días hemos tenido oportunidad de recibir ... y de rechazar argumentando la seriedad que debe concurrir en el proceso de revisión y de la que, por razones obvias, estaría huérfano en caso de haber aceptado tan exiguo período de entrega. Conocemos a un colega que ha optado por otra vía de respuesta: ha confeccionado una tabla de precios en la que se incluye el costo de la revisión en función del número de páginas del manuscrito y del tiempo máximo para hacer la revisión, minuta que hace llegar al editor de la revista como respuesta a su solicitud. Ni que decir tiene que nunca recibe, de nuevo, el encargo.

La consecuencia de todos estos dislates es evidente: no hay capacidad para dar abasto con tanto envío para publicar. Y, como además se asume que la revisión es un trabajo gratuito, que se hace por amor al arte, como parte del sistema de publicación que está salvaguardado por la “revisión por pares” (por cierto, un negocio más que lucrativo para las revistas *open access* que no necesitan maquetar el trabajo publicado pues lo hacen los autores, no pagan a los revisores, y cobran un buen pellizco a los autores), el resultado es que cualquier hijo de vecino se convierte de la noche a la mañana en revisor experto de casi cualquier área de conocimiento. Es en ese momento cuando los autores se hacen preguntas como las enunciadas al principio de este artículo.

## Las penurias del autor

En nuestro caso, que simultaneamos la investigación en Física Nuclear y en Física Médica, podemos decir que la arbitrariedad que esa pro-

bitraria di questa proliferazione di revisori con poca esperienza è molto più evidente nel secondo campo che nel primo. Anche se pure il primo settore di ricerca non è esente da opinioni curiose. Tempo fa un nostro articolo è stato rifiutato dal revisore con l'inoppugnabile argomentazione che avevamo già pubblicato due articoli riguardanti il nucleo  $^{208}\text{Pb}$  e che questo era già il terzo. Questo era vero, e non aveva senso discutere quanto esile fosse una simile motivazione, in cui nulla veniva indicato contro la metodologia seguita o contro i risultati ottenuti.

Ma, come abbiamo detto, dei due campi in cui svolgiamo il nostro lavoro, è quello della Fisica Medica che ha il merito di creare maggiori difficoltà agli autori. In una occasione, un revisore ha indicato nel suo rapporto che l'articolo era scritto molto bene, che l'esperimento era stato eseguito correttamente, che non aveva nulla contro le procedure impiegate per fare i calcoli, e anche che i risultati erano interessanti, ma che non gli piacevano. Il nostro appello al direttore di quella rivista (una rivista in ambito "bio" con un certo prestigio) non ha meritato nemmeno una risposta da parte sua. E qui non esiste il "silenzio-assenso amministrativo". In un'altra occasione ci siamo lamentati del ritardo nella revisione: erano passati più di sei mesi senza che si sapesse nulla del nostro manoscritto. Fortunatamente, e diciamo fortunatamente, perché sarebbe potuta accadere qualsiasi altra cosa, il poco diligente revisore ha sentenziato, dopo tutto quel tempo, in un rapporto più che sintetico: "Eccellente lavoro. Pubblicare così com'è".

I tempi di revisione, di cui le riviste si vantano tanto, sono uno dei primi aspetti che non vengono rispettati. E naturalmente, chi riceve sempre in ritardo le segnalazioni dei manoscritti inviati per la pubblicazione, si chiede: come è possibile che i tempi medi di risposta annunciati siano veri? Alcuni lavori devono essere stati revisionati quasi prima di essere inviati!

E un'altra domanda spiacevole: perché il numero di revisori non è sempre lo stesso? Recentemente, sulla stessa rivista, due nostri articoli sono stati recensiti, uno da ben quattro revisori, l'altro da uno solo. Supponiamo che non sia necessario sottolineare quanto sia divertente cercare di ordinare le indicazioni contenute in quattro

liferación de revisores con poca experiencia provoca, es mucho más patente en el segundo campo que en el primero. No está exento éste, no obstante, de opiniones curiosas: hace ya algún tiempo un artículo nos fue rechazado con el incontestable argumento del revisor de que anteriormente ya habíamos publicado dos trabajos sobre el  $^{208}\text{Pb}$  y que aquél era ya el tercero. Era cierto y de nada sirvió argumentar sobre la improcedencia de una razón como aquella, en la que nada se indicaba en contra de la metodología seguida ni de los resultados obtenidos.

Pero como decíamos, de entre los dos ámbitos en los que se desarrolla nuestro trabajo, la Física Médica se lleva la palma. En una ocasión, un revisor nos indicó en su informe que el trabajo estaba muy bien redactado, que el experimento estaba correctamente realizado, que no tenía nada en contra de los procedimientos seguidos para realizar los cálculos, incluso que los resultados eran interesantes, pero que no le gustaban. Nuestra apelación al editor de aquella revista (una del ámbito "bio" con un cierto prestigio) no mereció siquiera una respuesta por su parte. Y aquí el "silencio administrativo" no existe. En otra ocasión tuvimos a bien reclamar por la tardanza en la revisión: habían pasado más de seis meses sin noticias al respecto de nuestro manuscrito. Por suerte, y decimos bien, por suerte, porque podría haber pasado cualquier otra cosa, el poco diligente revisor dictaminó, pasado todo ese tiempo, en un más que escueto informe: "Excelente trabajo. Publíquese tal y como está".

Lo de los tiempos de revisión, del que las revistas tanto alardean, es uno de los primeros aspectos que se incumplen. Y claro, uno, a quien siempre le toca retraso en la recepción de los informes de sus manuscritos enviados a publicar, se pregunta: ¿cómo es posible que sea cierto el tiempo medio de respuesta anunciado? ¡Necesariamente algún trabajo ha debido de ser revisado casi antes de enviarlo!

Y otra cuestión harto desagradable: ¿por qué el número de revisores no es siempre el mismo? Recientemente, en la misma revista, dos artículos nuestros han sido revisados, uno, por hasta cuatro revisores, y el otro sólo por uno. Suponemos que no es necesario señalar lo divertido que resulta tratar de solventar las indicaciones con-

rapporti, ciascuno scorrelato rispetto agli altri, e con evidenti contraddizioni tra loro, in alcuni casi.

Una menzione particolare va fatta per i revisori con interessi. Innanzitutto, ci sono quei revisori che appartengono a gruppi che si occupano di argomenti molto specifici e che rivendicano la loro esclusività nel pubblicare articoli di ricerca in quel campo. Si incontrano con una certa frequenza revisori di questo tipo. Il problema principale, in questo caso, è che le loro relazioni sono quasi impossibili da affrontare e, se per qualche strano caso si trova la chiave per poter risolvere la diatriba, la relazione successiva (e quelle che possono seguire, se si è in vena di farlo) di solito solleva nuovi intoppi da risolvere, entrando così in una spirale senza soluzione. Questi censori sono particolarmente pericolosi perché non hanno problemi a mentire nelle loro affermazioni. In una delle occasioni in cui siamo stati fortunati con uno di questi revisori, siamo riusciti a smascherarlo: il nostro appello ha dimostrato senza ombra di dubbio che quanto affermato dal revisore era falso, che ciò che avevamo scritto nel nostro articolo era corretto e che, a nostro avviso, solo l'accettazione dell'articolo per la pubblicazione era possibile. Ingenui, non abbiamo fatto affidamento sul "terzo occhio", il membro del comitato editoriale incaricato di risolvere i conflitti tra autori e revisori. In quell'occasione, il suo rifiuto fu un vero e proprio shock: era vero quello che sostenevamo nella nostra risposta al revisore e all'editore, ma lui non vedeva nulla di interessante nell'articolo e quindi raccomandava di rifiutarlo, ovviamente senza chiarire in alcun modo questa affermazione apodittica.

Possiamo anche incontrare i revisori con interessi scoperti all'improvviso; vale a dire, revisori che, dopo aver esaminato l'articolo corrispondente, scoprono che è di loro enorme interesse e, quel che è peggio, che possono fare lo stesso lavoro molto meglio. In una occasione, quando abbiamo presentato per la pubblicazione un articolo su un certo argomento sul quale nessuno aveva pubblicato nulla da più di trent'anni, e che abbiamo affrontato con una simulazione Monte Carlo, dandogli una nuova veste, il revisore ci ha bloccato il più a lungo possibile chiedendoci di fare calcoli aggiuntivi, costringendoci a diversi giri di revisione. Quando il nostro ma-

tenidas en cuatro informes, cada uno "de su padre y de su madre", y con manifiestas contradicciones entre ellos, en algunas ocasiones.

Mención aparte merecen los revisores con intereses. En primer lugar aparecen esos revisores que pertenecen a grupos que abordan temáticas muy específicas y que se autoadjudican, en exclusiva, la capacidad de publicar trabajos de investigación en ese ámbito. Se encuentra uno, con cierta asiduidad, con este tipo de revisores. El principal problema, en este caso, es que sus informes son casi imposibles de abordar y, si por alguna extraña casualidad, uno da con la tecla para poder resolver la diatriba, el siguiente informe (y los que puedan seguir si se tienen ánimos para ello) suele arrojar pegadas nuevas que resolver, entrando así en una espiral sin solución. Estos revisores son particularmente peligrosos porque no tienen problema en mentir en sus aseveraciones. Una de las veces que nos tocó en suerte uno de estos conseguimos desenmascararlo: nuestra apelación demostró sin lugar a dudas que lo que el revisor decía era falso, que lo que habíamos escrito en nuestro artículo era correcto, y que, en nuestra opinión sólo era posible la aceptación del trabajo para su publicación. Ingenuos nosotros, no contábamos con el "tercer ojo", el miembro del comité editorial que ejerce para resolver los conflictos entre autores y revisores. Aquella vez su resolución fue de traca: era cierto lo que argumentábamos en nuestra respuesta al revisor y al editor, pero no veía nada interesante en el artículo y, por tanto, recomendaba rechazarlo, por supuesto, sin aclarar en ningún sentido tal exabrupto.

Podemos también encontrarnos con los revisores con intereses "descubiertos de pronto" que son aquéllos que tras revisar el correspondiente trabajo descubren que les interesa enormemente y, lo que es peor, que ellos pueden hacer el mismo trabajo mucho mejor. En una ocasión que enviamos a publicar un artículo sobre un tema en el que hacía más de treinta años que nadie había publicado nada, y que abordábamos mediante simulación Monte Carlo, dándole una nueva visión, el revisor nos entretuvo todo lo que pudo pidiéndonos hacer cálculos adicionales que no venían a cuento, forzando varias rondas de revisión. Cuando nuestro artículo apareció final-

noscritto fu finalmente pubblicato, nell'articolo appena prima del nostro, altri autori pubblicarono un calcolo quasi identico, con una descrizione piuttosto scarna e povera della procedura. Fortunatamente, ma è ovvio, la rivista aveva rispettato le date di ricezione dei manoscritti, e quello dei nostri stimati colleghi era di un paio di mesi successivo. Curioso che il direttore non sospettasse nulla, vero?

Infine, ci imbattiamo nei revisori educativi. Chi sono? Beh, quelli che soffrono della "sindrome del coautore", cioè quelli che si danno da fare per spiegare agli autori cosa dovrebbero fare nel loro lavoro, senza discutere minimamente la validità di ciò che è scritto nel manoscritto, il suo interesse, la sua applicabilità; in altre parole, senza fare il lavoro di revisore per il quale sono stati chiamati. Alcuni nostri colleghi si sono imbattuti in uno di questi revisori dopo aver inviato un articolo per la pubblicazione ad una rivista. Dopo un paio di revisioni e di fronte al fatto inconfutabile che non sarebbe stato possibile convincere il revisore a concentrarsi sul lavoro in esame, hanno deciso di inviarlo a un'altra rivista. Ma sono stati molto sfortunati perché hanno avuto lo stesso revisore che, senza esitare, ha ripresentato il rapporto di revisione corrispondente alla versione originale dell'articolo inviato alla prima rivista, senza cambiare una sola virgola.

## Soffrire come revisore

Alla luce degli aneddoti sopra riportati, potrebbe sembrare che fare il revisore non comporti alcuna difficoltà. Niente di più sbagliato, perché, proprio per il desiderio di pubblicare, generato come abbiamo già detto dal fatto che il numero di pubblicazioni è diventato il talismano necessario per ottenere un lavoro decente nel campo della ricerca, gli autori sono a volte più aggressivi di quanto sia strettamente necessario, dando vita a discussioni che spesso sfiorano l'assurdo.

In una di queste discussioni, molto recentemente, gli autori di un lavoro sperimentale hanno giustificato la mancata inclusione delle inevitabili incertezze nei loro risultati. Lo scopo del loro lavoro era quello di confrontare due fattori

mentre pubblicato, justo antes del nuestro, otros autores publicaban un cálculo casi idéntico, con una descripción del procedimiento más bien escasa y pobre. Afortunadamente, ¡es un decir, claro!, la revista había respetado la fechas de recepción de los manuscritos y el de nuestros dilectos colegas era de un par de meses más tarde. Curioso que el editor no sospechara nada, ¿verdad?

Están, finalmente, los revisores educativos. ¿Quiénes son éstos? Pues aquéllos que sufren el "síndrome de la co-autoría", es decir, aquéllos que se esfuerzan sobremanera en explicar a los autores lo que deberían hacer en su trabajo, sin entrar para nada en discutir la validez de lo que está escrito en el manuscrito, en su interés, en sus posibles aplicaciones; o sea, sin hacer el trabajo de revisor para el que han sido requeridos. Unos colegas nuestros sufrieron a uno de estos revisores después de mandar un artículo a publicar a una revista. Tras un par de rondas de revisión, y ante el hecho fehaciente de que no iba a ser posible convencer al revisor de centrarse en el trabajo bajo juicio, decidieron enviarlo a otra revista. Pero tuvieron muy mala fortuna porque les tocó en suerte el mismo revisor que, ni corto ni perezoso, les volvió a enviar el informe de revisión correspondiente a la versión original del artículo enviado a la primera revista, sin cambiar una sola coma.

## Sufriendo como revisor

A la vista de las anécdotas que hemos indicado antes, podría parecer que ejercer de revisor no comporta penuria alguna. Nada más lejos de la realidad, porque, debido precisamente al ansia por publicar, generada como ya hemos indicado porque el número de publicaciones se ha convertido en el talismán necesario para poder lograr un puesto de trabajo digno en el ámbito de la investigación, los autores resultan, en ocasiones, más agresivos de lo estrictamente necesario, dando lugar a discusiones que rayan, en muchas ocasiones, lo absurdo.

En una de estas discusiones, muy recientemente, unos autores de un trabajo experimental justificaban no incluir en sus resultados las inevitables incertidumbres. El objetivo de su trabajo era comparar dos factores de corrección que

di correzione da applicare alle misure ottenute con alcuni rivelatori irradiati con due diverse sorgenti radioattive; la loro conclusione era che era necessario cambiare il fattore a seconda della sorgente utilizzata. Chiaramente, senza le incertezze non era possibile stabilire se le differenze osservate tra i due fattori fossero significative o meno, e quindi la loro conclusione non era corretta. Nella loro risposta al rapporto, gli autori hanno indicato che si trattava di un lavoro iniziale, preliminare, e che quindi non era necessario indicare le incertezze delle loro misure, cosa che è richiesta solo se “si intende effettuare uno studio serio e rigoroso delle risposte dei rivelatori in questione”, cosa che non è avvenuta.

Ma le situazioni possono andare ben oltre e raggiungere livelli difficili da comprendere. Una volta uno di noi disse ad alcuni autori che dovevano includere le incertezze dei parametri determinati in vari *fit* a diverse serie di dati ottenuti con simulazioni Monte Carlo e che, in questi *fit*, dovevano tenere conto delle incertezze delle stime Monte Carlo stesse. Nel bel mezzo di tutto questo, il revisore ha ricevuto un messaggio da uno degli autori che gli comunicava di “sapere che lui era il revisore del suo articolo e che si sarebbe pentito di non aver accettato l’articolo cavillando sulle incertezze”. L’autore, all’epoca editore associato della rivista in cui intendeva pubblicare l’articolo, un personaggio arrogante se mai ce n’è stato uno, era riuscito a scoprire il nome della persona che aveva osato mettere in discussione il suo lavoro e non si era fatto scrupoli a inviare l’*e-mail* di minaccia. La cosa fu portata all’attenzione dell’editore della rivista, ma non ebbe alcuna conseguenza, e l’articolo fu pubblicato senza includere le informazioni che erano state richieste agli autori. Dopo questo fatto, altri autori hanno pubblicato un ampio articolo di rassegna sull’argomento ed il lavoro in questione non è stato citato, il che è indice del suo livello scientifico. Ma le domande rimangono: cosa spinge l’editore di una rivista presumibilmente seria e prestigiosa a rendere pubblico il nome del revisore di un articolo agli autori dello stesso? Perché prende la decisione di pubblicare un articolo pur sapendo che presenta evidenti carenze?

debían aplicarse a las medidas obtenidas con ciertos detectores sometidos a irradiación con dos fuentes radiactivas diferentes; y su conclusión era que era necesario cambiar el factor según la fuente utilizada. Evidentemente, sin las incertidumbres no era posible establecer si las diferencias observadas entre ambos factores eran o no significativas y, por tanto, su conclusión no era correcta. En su respuesta al informe los autores indicaban que era aquél un trabajo inicial, preliminar, y que, por ello, no era necesario indicar las incertidumbres de sus medidas, algo que sólo se requiere si se “pretendía llevar a cabo un estudio serio y riguroso de las respuestas de los detectores en cuestión”, que no era el caso.

Pero las situaciones pueden ir mucho más allá y alcanzar cotas difícilmente entendibles. En cierta ocasión uno de nosotros indicó a unos autores que era necesario que incluyeran las incertidumbres de los parámetros determinados en varios ajustes de distintos grupos de datos obtenidos en simulaciones Monte Carlo y que, en dichos ajustes, debían tener en cuenta las incertidumbres de las propias estimaciones Monte Carlo. En esas estaba cuando recibió un mensaje de uno de los autores en el que le hacía saber que “sabía que era el revisor de su trabajo y iba a lamentar no haber aceptado el trabajo poniéndole pegatas sobre las incertidumbres”. El autor, a la sazón editor asociado de la revista en la que pretendía publicar el trabajo, personaje arrogante donde los haya, había conseguido averiguar el nombre de aquél que osaba poner en tela de juicio su maravilloso trabajo y no había tenido reparo en enviar el amenazante *e-mail*. Puesto en conocimiento el hecho del editor de la revista, no tuvo consecuencia alguna y el artículo fue publicado sin incluir la información que se había solicitado a los autores. Con el tiempo, otros autores publicaron un extenso artículo de revisión del tema en el que el trabajo en cuestión no apareció citado, lo que da cuenta de su nivel científico. Pero quedan en el aire preguntas como: ¿Qué lleva al editor de una revista, supuestamente seria y prestigiosa, a hacer público el nombre del revisor de un artículo a los autores de ese artículo? ¿Por qué toma la decisión de publicar un trabajo aún a sabiendas de que tiene deficiencias manifiestas?

## Anche alcuni editori non hanno vita facile

A questo punto, forse è necessario spezzare una lancia a favore degli editori, almeno per alcuni degli editori delle riviste tradizionali. Per un certo periodo, come editore associato di una rivista, uno di noi è stato responsabile di un'area della rivista che non aveva nulla a che fare con il suo lavoro di ricerca. Quando ciò accade, il compito di trovare i revisori si complica e, in più di un'occasione, coloro che avevano accettato il lavoro lo hanno abbandonato dopo il tempo previsto per la revisione, con un danno reale non solo per gli autori, ma anche per le statistiche della rivista. Si tratta di un problema che riguarda inevitabilmente tutte le riviste scientifiche e che riteniamo sia dovuto quasi esclusivamente alla natura gratuita del processo di revisione.

Ma ci sono altri punti critici nel lavoro dell'editore, tra i quali quello dei revisori ansiosi, quei personaggi autocompiaciuti che pensano che il loro lavoro sia straordinario e che non si fanno scrupolo di chiedere agli autori di citare diversi loro articoli, che abbiano o meno a che fare con il lavoro che stanno recensendo. È una procedura davvero spregevole, eppure è fin troppo diffusa. Naturalmente, questi revisori possono vedere questo come un modo per farsi remunerare per i servizi resi.

## Epilogo

Tutti i nostri colleghi possono raccontare situazioni simili a queste. Siccome tutti lavoriamo come autori, molti anche come revisori e alcuni come editori, tutti possiamo rispecchiarci in queste situazioni che, alla fine, parlano solo del deterioramento di questo sistema adottato per rendere pubblica la ricerca che facciamo e per diffonderne i risultati. È urgente cercare delle soluzioni e probabilmente ce ne sono due che riteniamo possano essere fondamentali e che possano imporre un vero cambiamento in questo contesto. In primo luogo, dobbiamo sradicare quella che abbiamo chiamato sopra "numerite" quando si tratta di valutazione dei *curricula*. Non si tratta di una questione semplice, perché confrontare

## Tampoco lo tienen fácil algunos editores

Llegados a este punto, quizás es necesario romper una lanza también en favor de los editores, al menos de algunos de los de revistas tradicionales. Durante un cierto tiempo, ejerciendo de editor asociado de una revista, uno de nosotros estuvo encargado de un área de la misma que nada tenía que ver con su trabajo de investigación. Cuando eso ocurre, la tarea de buscar revisores es complicada y, en más de una ocasión, aquéllos que habían aceptado el trabajo renunciaban al mismo pasado el tiempo asignado para la revisión, lo que ocasionaba un verdadero menoscabo, no sólo para los autores, sino también para las estadísticas de la revista. Este es un problema que afecta, inevitablemente, a todas las revistas científicas y creemos que se debe, casi exclusivamente, a la gratuidad del proceso de revisión.

Pero la labor del editor tiene otros focos problemáticos entre los que cabe mencionar el de los revisores ansiosos, esos personajes muy pagados de sí mismos, que creen que su trabajo es extraordinario y que no tienen reparos en pedir a los autores que citen varios de sus artículos, tengan o no que ver con el trabajo que están revisando. Es éste un procedimiento realmente despreciable que, sin embargo, está demasiado extendido. Claro que, quizá, este tipo de revisores vean esta como la forma de cobrar por los servicios prestados.

## Epílogo

Cualquiera de nuestros colegas pueden relatar situaciones similares a estas. Como quiera que sea que todos ejercemos como autores, muchos también como revisores y algunos como editores, todos podemos vernos reflejados en estas situaciones que, en definitiva, no hablan sino del deterioro de este sistema para hacer pública la investigación que realizamos y difundir los resultados de la misma. Urge buscar soluciones y probablemente haya dos que entendemos que podrían ser fundamentales y forzar un verdadero cambio en este contexto. En primer lugar, hay que erradicar los que antes llamábamos "numeritis" en lo que respecta a la evaluación de los *curricula*. No es esta una cuestión simple porque la com-

ricerche condotte da due ricercatori diversi in campi scientifici diversi è praticamente impossibile. Ma ridurre tutto a indici come l' $h$  (che informa in prima istanza su quanto sia ampia la comunità scientifica a cui appartiene il ricercatore giudicato, ma questa potrebbe essere l'unica informazione contenuta in  $h$ ) è una sciocchezza, nonostante i bibliometri possano insistere sul contrario. La seconda sarebbe quella di formalizzare la *peer review* come un lavoro retribuito, da svolgere da parte di un gruppo relativamente ristretto di veri specialisti sufficientemente indipendenti nelle rispettive materie. Ovviamente questo da solo non sarebbe sufficiente, questo è certo, ma potrebbe essere un buon primo passo.

### Ringraziamenti

Il presente lavoro è stato parzialmente finanziato dal Ministerio de Ciencia y Competitividad (PID2019-104888GB-I00) e dal Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades (PID2022-137543NB-I00) de Spagna, dal Fondo Europeo di Sviluppo Regionale (FESR) e dalla Junta de Andalucía (FQM387).

paración de la investigación realizada por dos investigadores distintos en ámbitos científicos distintos es prácticamente imposible. Pero reducir todo a índices como el  $h$  (que informa en primera instancia de lo grande que es la comunidad científica a la que pertenece el investigador juzgado, y esta podría ser la única información contenida en  $h$ ) es una memez, por más que los bibliómetras se empeñen en asegurar lo contrario. La segunda sería formalizar la labor de revisión como un trabajo remunerado y que realice un grupo relativamente reducido de verdaderos especialistas en las respectivas materias y suficientemente independientes. Obviamente no bastaría con esto sólo, eso es claro, pero podría ser un buen primer paso.

### Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado parcialmente por el Ministerio de Ciencia y Competitividad (PID 2019-104888GB-I00), el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades (PID2022-137543NB-I00), el Fondo Europeo para el Desarrollo Regional (ERDF) y la Junta de Andalucía (FQM387).



**Marta Anguiano Millán:** è Professore Ordinario di Fisica Atomica, Molecolare e Nucleare presso l'Università di Granada. Si occupa di problemi di struttura nucleare e di applicazioni di tecniche nucleari in ambito medico. È coautore di oltre 80 articoli su riviste indicizzate e ha partecipato a più di 20 progetti di ricerca. Ha valutato progetti di ricerca in Spagna e Francia, è stata editore associato della rivista *Física Médica* (2007-2013) e revisore per oltre 10 riviste di fisica medica e fisica nucleare.

**Antonio Miguel Lallena Rojo:** è Professore Ordinario di Fisica Atomica, Molecolare e Nucleare presso l'Università di Granada. Si occupa di problemi di struttura nucleare e di applicazioni di tecniche nucleari in ambito medico. È coautore di oltre 200 articoli su riviste indicizzate, ha partecipato a più di 50 progetti di ricerca, ha pubblicato 4 libri divulgativi, ha supervisionato 16 tesi di dottorato e ne sta supervisionando altre 5, ha partecipato all'organizzazione di una ventina di conferenze specialistiche, ha valutato progetti di ricerca in Spagna, Francia, Repubblica Ceca, Nuova Zelanda e Argentina, è stato editore associato della rivista *Physica Medica: European Journal of Medical Physics* (2007-2013) e, occasionalmente, di *Medical Physics* (2011), e revisore per oltre 40 riviste di fisica medica e fisica nucleare.



---

# Il fallimento dell'istruzione e della divulgazione scientifica (con possibili rimedi)

**Ferdinando Boero**

Fondazione Dohrn della Stazione Zoologica Anton Dohrn

---

La nostra è una specie animale che impara e abbiamo sviluppato un sistema di istruzione istituzionalizzato: la scuola. Dato che la scuola non basta a fornire le conoscenze necessarie, e dato che queste evolvono, ad essa abbiamo affiancato la divulgazione, non rivolta soltanto ai giovani ma a tutto il pubblico: un continuo aggiornamento delle conoscenze, per formare cittadini consapevoli.

Per quel che riguarda la scienza, le carenze formative e divulgative sono enormi. Quando mi accorsi che gli studenti del primo anno di scienze biologiche e di scienze ambientali non conoscevano la differenza tra escrezione ed eliminazione, feci un esperimento nella prima lezione di ogni corso universitario che ho insegnato. Mi è capitato spesso di essere la prima persona che incontravano all'università, dopo tredici anni di formazione preuniversitaria.

Senza dir nulla, scrivevo sulla lavagna PIPÌ POPÒ e poi chiedevo: chi sa dirmi come si forma la pipì e come si forma la popò? Per spiegare meglio dicevo: avete visto la pubblicità dell'acqua che fa fare tanta plin plin? Tutti l'avevano vista.

Bene, che strada fa l'acqua all'interno del nostro corpo per diventare pipì? Chi pensa di saperlo alzi la mano. In più di vent'anni nessuno ha alzato la mano. Sapere come si forma la pipì significa sapere come funziona l'insieme del nostro corpo. Tutti avevano le informazioni per rispondere, ma non erano in grado di trasformarle in conoscenza. La risposta implica la conoscenza dell'apparato digerente, e poi di quello circolatorio, respiratorio, del metabolismo cellulare e dell'apparato escretore. Ogni argomento è trattato nei corsi preuniversitari, ma uno alla volta. Per rispondere alla domanda della pipì bisogna saperli mettere assieme: è qui che avviene il passaggio dall'informazione alla conoscenza. La cosa grave è che nessuno si era mai posto la domanda, con l'illusione di conoscere una risposta che non era, invece, alla portata della loro formazione.

Posi la stessa domanda a Piero Angela, prima della registrazione di una puntata di Superquark, e lui confessò di non sapere la risposta. Anche se aveva curato un programma intitolato "viaggio nel corpo umano". Bene: non sappiamo come funziona il nostro corpo.

Se chiedo “quali sono gli animali più importanti del mondo?”, e “quali sono le piante più importanti del mondo?”, a nessuno vengono in mente i copepodi e le diatomee. La superficie del pianeta è coperta per il 71% dall’oceano globale. In realtà l’oceano non è una superficie, è un volume, e costituisce più del 90% dello spazio abitato dalla vita. Se parliamo di organismi più importanti nel garantire il funzionamento degli ecosistemi planetari li dobbiamo cercare in mare. E la risposta, lo ripeto, è: copepodi e diatomee. La stragrande maggioranza della popolazione non lo sa. Bene: non sappiamo come funziona il mondo vivente, di cui siamo parte e senza il quale non possiamo vivere.

Non sapere come funzioniamo noi e come funziona il mondo non è male come lacuna culturale. Queste dovrebbero essere le basi su cui costruire il resto delle conoscenze. E quindi: ci mancano le basi. Interviste estemporanee ai colleghi della facoltà di scienze mi fecero capire che, a parte i biologi, i colleghi non conoscevano le risposte. Alla richiesta di valutare il grado di preparazione degli studenti, dopo la prima lezione, non potevo che rispondere che il livello di conoscenza è sottozero e che bisogna ricominciare da capo.



**Figura 1:** Edificio del museo Darwin-Dohrn nella Villa Comunale di Napoli con scheletro di balenottera. (Foto di F. Boero.)

Una volta una ragazza alzò la mano e spiegò così il funzionamento del nostro corpo:

“... abbiamo due apparati digerenti, uno per i liquidi e uno per i solidi; quel che beviamo va in quello dei liquidi e il prodotto di scarto è la pipì, mentre quel che mangiamo va in quello dei solidi, e

da lì deriva la popò; se qualcosa ci va per traverso, allora quel che abbiamo ingerito ha preso la strada sbagliata. ”

Tutti ridevano ma nessuno sapeva rispondere. La ragazza, ovviamente, era la più in gamba, la più portata per la scienza. Secondo Faber e Proops [1] la scienza si fonda su tre fasi: la prima è l’identificazione dell’ignoranza, la seconda è la formulazione di ipotesi per ridurla; la terza è la verifica delle ipotesi. La ragazza aveva capito di non sapere, aveva identificato l’ignoranza, e aveva formulato un’ipotesi che, ovviamente, non avrebbe retto al vaglio, e quindi avrebbe dovuto formularne un’altra. Ma se non sai di non sapere, non diminuirai mai la tua ignoranza.

## La strategia OHHHH

I sistemi formativi, per definizione, sono noiosi. Il motivo è semplice: sono fondati su astrazioni che i discenti devono apprendere restando immobili nei banchi o piegati sui libri, una sorta di alienazione dal mondo esterno che li circonda, e che vorrebbero conoscere. Edward Wilson ha coniato la parola **biofilia** per dare un nome alla naturale propensione dei giovani umani verso il mondo vivente. Ha anche scritto un libro tradotto in Italiano [2]. La biofilia, invece di essere assecondata, viene estirpata dalle giovani menti, per essere sostituita con astrazioni che poco hanno a che fare con il mondo reale. La divulgazione cerca di essere più accattivante e, di solito, si incentra sulla natura, soprattutto gli animali.

I musei di storia naturale, una evoluzione delle camere delle meraviglie del XVI e XVII secolo, sono in gran parte dedicati agli animali, prima mostrati imbalsamati all’interno di armadi, poi inseriti in ricostruzioni dei loro habitat naturali. I musei di storia naturale di Londra, Parigi, New York, Washington, Chicago, Berlino, Vienna, Leiden sono musei nazionali, e sono magnifici. Quale è il museo nazionale di storia naturale nel nostro paese? Inutile che ci pensiate: non c’è. E questo la dice lunga sulla nostra cultura della natura.

Nei musei, però, si tende a meravigliare il pubblico, a fargli fare OHHHH. Lo stesso avviene



**Figura 2:** La vetrina delle reliquie dove sono esposti i preparati in liquido realizzati dai conservatori della Stazione Zoologica. Inserita nella vetrina si ammira la ricostruzione dello studio di Salvatore Lo Bianco, maestro di conservazione degli animali marini. (Foto di F. Boero)

negli acquari e nei giardini zoologici. La natura, poi, ci entra in casa con la documentaristica televisiva. Anche in questo caso, però, la prima finalità è l'intrattenimento legato a meraviglia. Si mostrano animali carismatici come leoni, balene, tigri, delfini, tartarughe; oppure habitat esotici, come le formazioni coralline e le foreste tropicali. In tutti i casi si mostrano animali e habitat con la finalità di destare la meraviglia a cui accennavo prima: OHHH.

Se però si chiede quali siano gli animali e le piante più importanti... la risposta non arriva. Qualcuno dice le api, ma la porzione terrestre della biosfera è poca cosa, rispetto al 90% dello spazio abitato dalla vita (l'oceano), e non ci sono insetti in mare!

Migliaia di ore di documentari e imponenti edifici e strutture dedicati alla natura, e nessuno sa quali sono gli animali e le piante più importanti per il funzionamento degli ecosistemi planetari. E, come per la pipì, la cosa più grave è che nessuno è conscio di non sapere cose di un'importanza così pervasiva, sentendosi al sicuro del proprio striminzito bagaglio di conoscenza. Una cono-

scenza che non comprende il funzionamento del proprio corpo e degli ecosistemi che ci permettono di vivere. Bazzecole, pinzillacchere. Vuoi mettere i teoremi con dimostrazione e le poesie da imparare a memoria? Non fraintendetemi, ora. Non dico che non sia necessario conoscere teoremi e poesie, dico solo che forse è necessario anche conoscere il nostro corpo e gli ecosistemi.

## Il museo Darwin-Dohrn

Per rispondere a domande riguardanti la struttura, il funzionamento e l'evoluzione degli ecosistemi marini (vale la pena ripetere: più del 90% dello spazio abitato dalla vita) mi sono divertito, assieme a tre giovani colleghi, a progettare un museo diverso da ogni altro.

Un museo dove gli OHHH di meraviglia portano agli AHHH di consapevolezza. Il Museo si chiama Darwin-Dohrn ed è a Napoli, accanto alla Stazione Zoologica di Napoli e al suo Acquario che, nel 2024, compie 150 anni. Il Museo, attraverso un percorso espositivo sequenziale, porta il visitatore a farsi domande e, poi, a tro-

vare risposte (AHHH) con diversi momenti di meraviglia (OHHH).

## Non ve lo spiego

Sadicamente, in questo articolo non spiego come si forma la pipì e perché copepodi e diatomee sono gli animali e le piante più importanti del mondo, e non spiego neppure la logica espositiva del Museo Darwin Dohrn. Il riconoscimento della propria ignoranza, se l'ignoranza c'è, deve innescare la voglia di conoscere ed è il primo passo verso una cultura che comprenda le cose più importanti. Se fate parte della sparuta schiera di chi "lo sa già", spero che avrete voglia di divulgare meglio le vostre conoscenze, perché la maggior parte della popolazione "non lo sa". I lettori di questo articolo che verranno a visitare il Museo Darwin-Dohrn sono caldamente consigliati di prenotare una visita guidata e, magari, di cercarmi. Se presente, adoro mostrare il "mio" museo, ma le guide della Fondazione Dohrn sono preparatissime e sono in grado di spiegare tutto quello che potrei spiegare io.

La cosa incredibile è che tutti i visitatori si divertono moltissimo ad apprendere queste cose e quindi mi chiedo: come mai i programmi di intrattenimento naturalistico (e i musei, e gli zoo e gli acquari) non le spiegano? Per i documentari la risposta è semplice: i documentaristi sono bravissimi tecnicamente, sanno perfettamente COME divulgare, ma non sanno COSA divulgare e si fermano alle cose più ovvie e appariscenti. I curatori di musei, zoo e acquari magari fanno il necessario ma, di solito, sono abbagliati dalla loro specifica area di interesse scientifico e non la collegano con il resto di quel che compone il mondo naturale, soffermandosi su dettagli e perdendo di vista l'insieme, le interazioni.

## Riduzionismo e olistico

La scienza adotta da sempre l'approccio riduzionistico: la complessità viene ridotta e se ne analizzano porzioni, considerando come ininfluente il resto. Ogni specialista, quindi, conosce a menadito il proprio argomento ma ignora gli altri o, comunque, non li conosce così approfonditamente come conosce il suo tema specifico di ricerca.

Dato che il tutto è più della somma delle parti, l'analisi riduzionista deve poi portare ad una sintesi olistica dove le parti interagiscono a formare un tutto. Dagli apparati del nostro corpo, alle componenti di biodiversità ed ecosistemi.

I sistemi di formazione e divulgazione sono eminentemente riduzionisti, ma per capire veramente il mondo è necessaria la transizione dal riduzionismo all'olismo. Ecologia e biologia evolutiva sono quanto di più olistico ci sia, nella scienza. Identificano le parti in modo riduzionistico e poi le fanno interagire in modo olistico.

Charles Darwin è il fondatore della teoria dell'ecologia e dell'evoluzione, una delle più solide teorie scientifiche mai formulate. Anton Dohrn fondò la Stazione Zoologica che oggi porta il suo nome proprio per confermare empiricamente, sperimentalmente e anche con formulazioni matematiche le teorie darwiniane, attraverso lo studio del mondo marino che vive nel golfo di Napoli. E quindi il museo non può non portare i loro nomi.

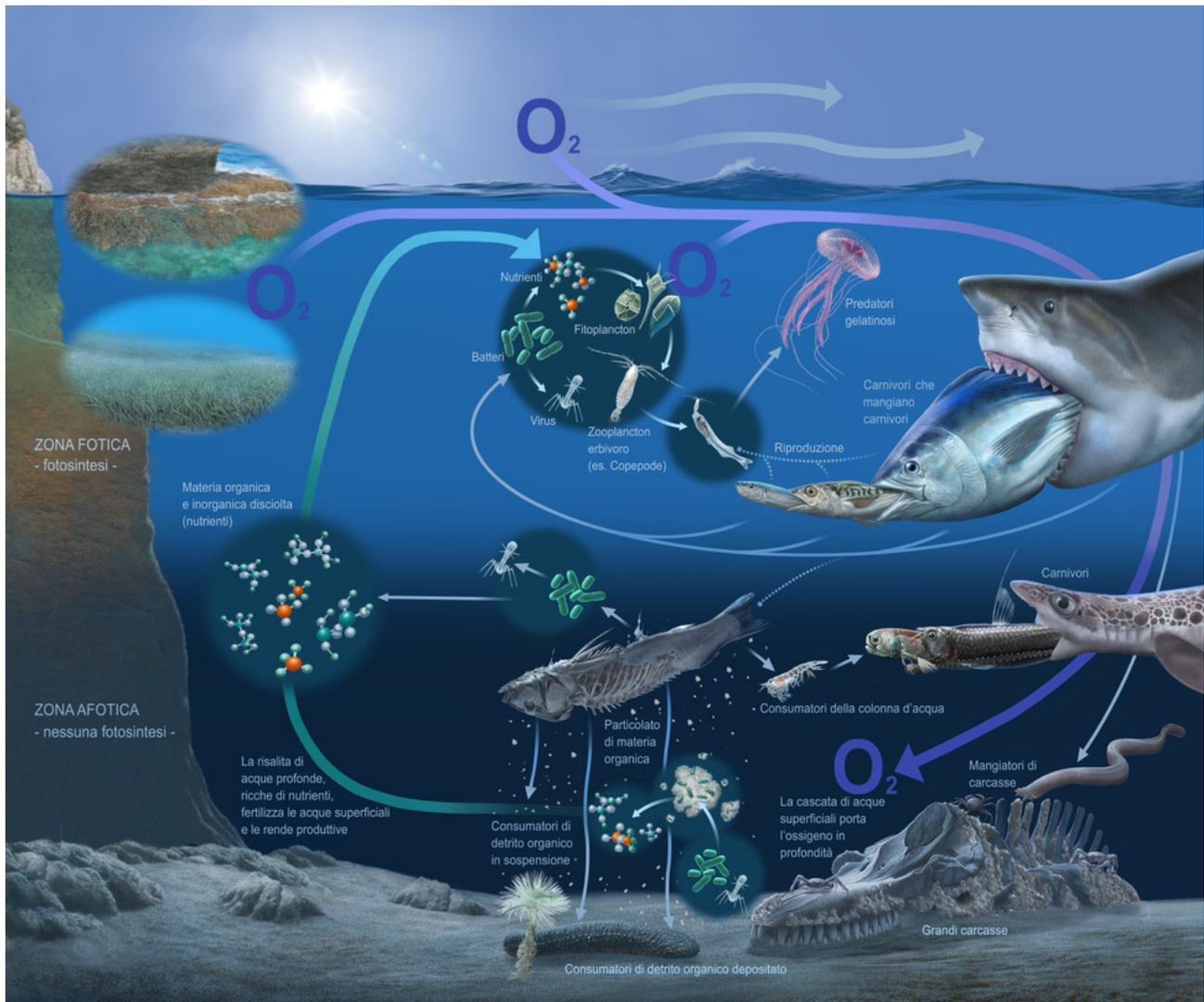
## Appendice: come funziona il mondo biologico

Prima ho scritto "non ve lo spiego": ci ho ripensato. Lo spiego in modo molto sintetico, utilizzando uno schema grafico, realizzato con la solita maestria da Alberto Gennari.

La superficie del pianeta è coperta per il 70% dall'oceano che però non è una superficie: è un volume! Più del 90% dello spazio abitato dagli esseri viventi è costituito dalla colonna d'acqua. La terra è un'eccezione. Il volume oceanico è la regola. È l'oceano a far funzionare il mondo biologico. La Figura 3 mostra uno schema del funzionamento dell'ecosistema marino.

(In alto a destra.) Il paesaggio marino è dominato dai carnivori. Lo squalo mangia il tonno, che mangia lo sgombro, che mangia la sardina. Sono tutti carnivori, dove sono gli erbivori? Dov'è l'erba?

(In alto a sinistra.) Le alghe e le piante marine vivono nella zona illuminata del mare, lungo la costa, e sono mangiate dagli erbivori, ma



**Figura 3:** Schema di funzionamento dell'ecosistema marino. (Il progetto grafico è di Ferdinando Boero la realizzazione di Alberto Gennari. La tavola è esposta al museo Darwin-Dohrn.)

il loro contatto con la vastità del volume oceanico è minimo.

(In alto al centro.) I pesci iniziano la loro vita come minuscole uova che diventano embrioni, poi larve, e poi stadi giovanili. Nella prima parte della loro vita mangiano piccoli crostacei planctonici i copepodi: gli erbivori sono loro, e mangiano le alghe unicellulari microscopiche che formano il fitoplancton: l'erba! Tutti gli organismi muoiono, sono decomposti dai batteri. a loro volta risorsa per i virus, e dalla decomposizione si formano i nutrienti che sosterranno il fitoplancton. L'ossigeno prodotto in superficie viene portato in profondità dalle correnti discendenti. Gli ecosistemi funzionano grazie ai microbi!

(In basso al centro.) Gli organismi della zona illuminata muoiono e precipitano nel buio verso il fondo marino. Sono aggrediti dai batteri

che li decompongono in sostanza organica particolata: la neve marina. Questa viene mangiata dai sospensivori, come i crostacei che vivono in profondità e la fauna che vive sul fondo, come anellidi e cetrioli di mare.

(In basso a destra.) Gli organismi che mangiano detriti prendono il posto degli erbivori e sostengono una rete alimentare di carnivori. Le grandi carcasse scendono sul fondo marino e diventano isole di cibo per moltitudini di mangiatori di cadaveri. Gran parte dello spazio abitato dagli esseri viventi è al buio. Le correnti discendenti che portano l'ossigeno in profondità generano delle correnti ascendenti che portano in superficie i nutrienti che sosterranno il fitoplancton.

Una descrizione più accurata della Figura 3 si trova nel video della Referenza [3].



- [1] M. Faber, J. Proops: *Evolution, Time, Production and the Environment.*, Springer, Berlin (1993).
- [2] E. O. Wilson: *Biofilia*, Feltrinelli, Milano (2021).
- [3] <https://www.ilfattoquotidiano.it/2023/10/28/breve-spiegazioncina-su-come-funziona-il-mondo-lo-sapevate-tranquilli-nessuno-lo-sa/7334392/>



**Ferdinando Boero:** è nato a Genova nel 1951. Ha iniziato la carriera universitaria presso l'Università di Genova, dove è stato ricercatore dal 1981 al 1987. Dal 1987 al 1993 è stato professore associato all'Università di Lecce, e professore ordinario dal 1993 al 2018 presso l'Università del Salento, per poi passare all'Università di Napoli Federico II. In pensione dal 2021. Attualmente è *chair* alla Stazione Zoologica Anton Dohrn e presidente della Fondazione Dohrn. Si occupa di biodiversità marina e funzionamento degli ecosistemi, museologia scientifica, filosofia della scienza. Ha partecipato alla redazione di documenti di indirizzo per la Commissione Europea, il G7, la FAO, il Ministero dell'Università e della Ricerca Scientifica, l'Accademia Pontificia delle Scienze. Ha contribuito alla ideazione del volume *Generazione Oceano*, un episodio delle avventure di Topolino. Vicepresidente di Marevivo. Medaglia per l'Oceanografia dell'Institut Océanographique de Paris. Medaglia per le scienze fisiche e naturali dell'Accademia Nazionale delle Scienze o dei XL. Tridente d'oro.

# L'accettazione sociale della matematica

**Daniele Gouthier**

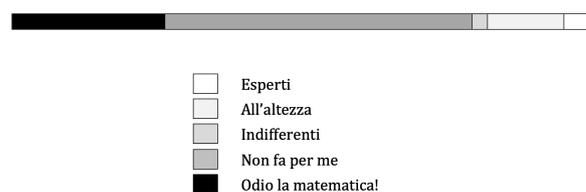
Master in Comunicazione della Scienza "Franco Prattico", Sissa, Trieste e  
Scienza Express edizioni, Trieste

Viviamo in anni in cui, per chi si occupa di comunicazione della scienza, è evidente che l'impatto della matematica sulla società è cruciale. Così come, viceversa, l'accettazione sociale della matematica è vitale per la matematica stessa. Da un lato, sempre più questioni di cittadinanza hanno a che fare con la comprensione del ruolo della matematica, il che non significa necessariamente che serva una conoscenza tecnica della stessa. Oggi essere cittadini richiede avere chiavi di lettura dei fenomeni e strumenti per contribuire alle scelte politiche, economiche e civili che sfruttano strumenti concettuali matematici: dalle elementari percentuali ai modelli dell'intelligenza artificiale, dal distanziamento nella fase acuta dell'emergenza Covid alla lettura dei grafici; e molto altro. Dall'altro, abbiamo bisogno di più giovani che scelgano discipline STEM, nelle quali la media dei laureati in Italia è del 6,7%, rispetto al 12-13% europeo (Eurostat, 2024). Una stima, sempre dell'Eurostat, ci dice che servono 1,3 milioni di laureati e diplomati ITS entro il 2027; e, per dare un metro di paragone, i laureati all'anno in tutte le discipline sono come ordine di grandezza 3-400 mila. Per avere più laureati STEM, è necessario che ci sia una maggior accettazione sociale della matematica e che i giovani la vedano come un'opportunità possibile per il proprio futuro e per costruirsi la propria vita.

Possiamo così dire che strumenti matematici sono essenziali per essere cittadini consapevoli e che l'accettazione sociale è essenziale per avere una matematica e le altre discipline STEM vitali.

Su questa doppia necessità mi concentro, lasciando da parte la pur importantissima dimensione culturale della matematica e il suo impatto sulle arti.

La chiave di volta che regge l'edificio che dobbiamo erigere è l'accettazione sociale della matematica e ben sappiamo che si tratta di un'accettazione sociale molto bassa, caratterizzata da pochissimi esperti, da una piccola fascia di persone che si ritengono all'altezza, da una molto più ampia di persone che si ritengono non portate e dicono "non fa per me" e da una non piccola di persone ostili che "odiano la matematica". A differenza di altre discipline manca quasi del tutto il centro della distribuzione formato dagli indifferenti. In modo del tutto qualitativo possiamo vedere la società suddivisa in questo modo.



**Figura 1:** Distribuzione relativa degli italiani secondo la loro opinione sulla matematica.

La domanda è come possiamo agire noi che abbiamo a cuore la matematica, le discipline STEM e l'evoluzione della nostra società in modo che stia al passo con i tempi, per incidere sul reale migliorando l'accettazione sociale della matematica, in particolare da parte dei giovani. Che cosa e chi spinge i giovani a considerarsi non all'altezza

della disciplina? Schematizzando, gli attori sono tre: la società nel suo complesso, la famiglia e la scuola. Ciascuno dei tre dice in qualche modo che la matematica è per pochi, che bisogna essere geni (meglio se maschi), che la matematica non serve a nulla e che chi la fa è *nerd*, secchione e un po' strano, ovviamente colorando di tinte più o meno esplicitamente negative tutti e tre gli aggettivi. Non possiamo ignorare questa cornice né abbiamo grandi speranze di sovvertirla.

Lasciatemi lo spazio di una parentesi su questo punto, giusto perché non vi rimanga l'idea che la mia sia una riflessione pessimista. Il linguista americano George Lakoff era solito il primo giorno del corso entrare in aula e assegnare ai suoi studenti di scienze cognitive a Berkeley un esercizio. L'esercizio consiste in questo: "non pensate a un elefante". Che cosa succedeva non appena lo enunciava? Che tutti i presenti in aula, i quali fino a quel momento tutto avevano in mente tranne che gli elefanti, si trovavano a immaginare chi Dumbo e chi un grande animale grigio, chi l'avorio e chi il circo, chi il bracconaggio e chi le campagne dell'India o dell'Africa. L'esercizio di Lakoff serve a illustrare il concetto di *frame*, di cornice. Ogni tema che proponiamo, anche la matematica, entra a far parte di un discorso pubblico che coinvolge tutta la società, e in quanto tale va a collocarsi in una cornice che noi non controlliamo, che, a differenza di "non pensate a un elefante", non è controllata da nessuno ma è presente e muta nel tempo lentamente e in modi che non siamo in grado di prevedere. La cornice della matematica è fatta di genialità e di calcoli, di difficoltà e di ereditarietà, di genere e di occhiali, cappelli arruffati e abbigliamento informale. Non è importante quanto di vero ci sia in tutto questo: è la cornice e dobbiamo prenderne atto. Se la ignoriamo, ogni nostra azione per migliorare l'accettazione sociale della matematica sarà più faticosa se non addirittura inefficace. Chiusa la parentesi.

Per agire verso la società nel suo complesso, meglio: con la società nel suo complesso, le leve sono quelle della cultura e dell'informazione, dell'intrattenimento e della divulgazione, della formazione alle professioni matematicamente deboli e della pressione sui decisori politici, economici e civili in genere. Non poche azioni vengono già messe in atto: dalla divulgazione

libreria ai fumetti, dai festival al teatro, dalle mostre ai musei, dai giochi alle conferenze per un pubblico ampio, dalla radio ai gruppi social, canali YouTube, pagine Instagram e molto altro. Altre andranno pensate per formare alla matematica chi fa lavori matematicamente deboli e per interagire in modo costruttivo e coerente su chi prende decisioni che ricadono sulla società tutta.

L'attore verso il quale è più arduo agire è, dal mio punto di vista, la famiglia. I genitori contribuiscono in modo profondo all'immagine che della matematica hanno i loro figli. Lo fanno proponendo giochi e giocattoli e soprattutto escludendone molti dalle possibili scelte: nel nostro paese è molto debole la cultura dei giochi da tavolo tra i quali sono presenti molti esempi che aiutano una *forma mentis* aperta alla matematica. Lo fanno (non) leggendo e (non) leggendo ai propri figli: l'esempio della lettura è il primo attivatore della passione per la lettura stessa; e un giovane che legge ha meno problemi con la comprensione del testo che a sua volta è un grosso ostacolo alla formazione matematica a partire dall'adolescenza. Soprattutto però un giovane che legge è una persona a contatto con la creatività e con la circolazione di idee ed esperienza, due motori irrinunciabili a fare buona matematica. Lo fanno dicendo "io la matematica non la capivo e quindi non mi aspetto che la capisca tu": instillare la convinzione che non si possa fare significa mettere un macigno sulla strada di chi dovrebbe poter iniziare a sperimentare in autonomia. Lo fanno dicendo "tu sei femmina, altre sono le cose per te": se continuiamo a dire che le discipline STEM sono da maschi e per le femmine ci sono quelle di cura e quelle *soft*, la profezia finisce con l'autoavverarsi. Purtroppo, però, la nostra possibilità di incidere sulle famiglie e di aiutarle a costruire una mentalità diversa a riguardo della matematica è estremamente difficile e mancano le sedi aggregative e di incontro dove lavorare in modo efficace. Con questo non intendo affermare che esperimenti non vadano provati, ma con la consapevolezza che cambiare la mentalità nelle case è estremamente lento e faticoso. È più facile che cambiamenti in questa dimensione profonda della cultura avvengano in modi inattesi e incontrollabili per fenomeni fuori dal nostro controllo.

L'attore sul quale è più facile e quindi, dal mio punto di vista, ha più senso agire per migliorare l'accettazione sociale della matematica è la scuola. La scuola è fatta da professionisti, abilitati e arruolati dallo Stato (su modi, tempi e forme di abilitazione e arruolamento ci sarebbe molto da dire ma, anche in questo caso, "il margine è troppo stretto..."). C'è una difficoltà ma comunque presente osmosi tra i diversi gradi di scuola e tra questa e l'università. L'università e gli accademici hanno un ruolo non piccolo nella formazione iniziale, e in parte in quella in itinere, degli insegnanti. Da tempo l'università e gli accademici, nella cornice della "Terza missione" ma anche in quelle della ricerca e della didattica, interagiscono con la scuola per contribuire a indirizzarla e a darle forma. Minore è l'impegno per accrescere l'accettazione della matematica a partire dalla scuola. In questa categoria di azioni, vedo il "Piano Lauree Scientifiche", i cui obiettivi però sono l'orientamento degli studenti e la formazione degli insegnanti, e l'organizzazione di Olimpiadi, giochi e gare matematiche, che si propone di promuovere l'approfondimento della matematica. Verso la scuola è però importante lavorare perché la matematica sia accettata e fatta propria anche da chi non si orienterà a studi e professioni STEM. Ci serve accrescerne l'accettazione nei cittadini che all'indomani dell'esame di Stato che conclude la scuola secondaria faranno scelte matematiche deboli o, addirittura, a contenuto matematico nullo, ipotizzando che qualcosa abbia contenuto matematico nullo.

Per essere efficaci, è importante che ci concentriamo sui primi passi, e in particolare sulla scuola primaria e sulla secondaria di primo grado (le elementari e le medie, avremmo detto un tempo). Quasi vent'anni di lavoro nella formazione degli insegnanti di matematica mi hanno dato la consapevolezza che molte maestre e maestri delle elementari insegnano matematica *obtorto collo*, si sentono costretti e vivono con difficoltà gli anni in cui la dirigenza assegna loro questa disciplina. Con questo non voglio dire che non ci siano maestre e maestri che con la matematica lavorano serenamente e in modo consapevole, ma che per molti l'atteggiamento è fortemente difensivo. E questo li spinge a insegnare la matematica come un insieme di regole e di procedure, molte delle quali hanno cittadinanza solo nella

matematica da banco e non in quella vera, e ad affidarsi a metodi che partono da affermazioni che sollevano più di qualche dubbio come "perché l'analogia e non la logica è lo strumento per conoscere le cose nuove".

Lo stesso lavoro nella formazione insegnanti mi ha anche messo davanti all'evidenza che chi insegna matematica alle medie spesso ha una preparazione matematicamente debole. Basta uno sguardo alla lista di lauree che danno accesso alla classe di concorso per rendersi conto che la formazione matematica degli insegnanti è spesso residuale: se poi pensiamo che in moltissime realtà oltre l'80% ha una laurea in biologia e scienze naturali, il quadro è completo. Attenzione! Esistono molti insegnanti delle medie che, pur provenendo da una formazione diversa, si sono costruiti una solida competenza nell'insegnamento della matematica e nella comprensione di come facilitarne al meglio l'apprendimento. Rimane però il fatto che per molti di più la matematica è disciplina che vanno consolidando mentre la insegnano. Al di là delle conoscenze che possono esplorare e sviluppare negli anni, rimane però che la visione di insieme sulla disciplina e la sensibilità per ciò che conta in matematica, per troppi insegnanti è carente. E questa sensibilità poco affinata spesso contribuisce a trasmettere misconcezioni e rafforzare stereotipi che mal si conciliano con una sana e serena accettazione della matematica da parte dei loro allievi. Il loro insegnamento è molto sbilanciato sul calcolo, a discapito della dimensione qualitativa e descrittiva della matematica. Così come preferiscono gli esercizi procedurali, per i quali è più facile addestrare a passaggi ben definiti, ai problemi, che ammettono vie diverse per avvicinarsi alla soluzione e che proprio per questo richiedono creatività e una *forma mentis* più vicina a quella del fare matematica. Inevitabilmente, si muovono sul terreno tecnico e insegnano la grammatica della matematica sacrificando o, se non altro, comprimendo creatività e pensiero autonomo. È un po' come se a me, che ho fatto quarant'anni fa un liceo classico e che in quel contesto ho seguito un corso di chimica di due ore la settimana per un unico anno scolastico, venisse chiesto di risolvere problemi di chimica e di farlo con creatività e immaginazione. Mi sentirei inadeguato, cercherei di evitare questo compito

e mi rifugerei nelle technicalità che potrei far mie studiando il libro di testo.

Alle maestre e ai maestri che insegnano matematica *obtorto collo* e agli insegnanti delle medie che per storia personale si limitano alla grammatica della matematica dobbiamo pensare prima che entrino in aula e non solo per la dimensione delle conoscenze che devono acquisire per insegnare in modo proficuo la disciplina, ma anche perché ne trasmettano un'immagine autentica e contribuiscano, dalla loro posizione cruciale, alla formazione di una sana e serena accettazione sociale della matematica. Per insegnare in modo proficuo, hanno bisogno di sapere come va avanti la storia. Serve avere una visione complessiva, ad esempio, di come nascono i diversi insiemi numerici. Serve avere le idee su concetti fondamentali quali quello di funzione o di gruppo. Serve avere consapevolezza che la matematica nei secoli è evoluta, non è statica, e, di nuovo ad esempio, che alla geometria euclidea si sono affiancate quelle non euclidee: il piano è uno dei mondi geometrici possibili, ma l'iperboloide e la sfera sono mondi diversi e altrettanto significativi e interessanti. Non sto dicendo che debbano insegnare la genesi degli insiemi numerici, le funzioni, i gruppi e le geometrie non euclidee. Sto dicendo che devono conoscerle, se non tecnicamente, culturalmente sì, per avere una visione più realistica della matematica.

In modo analogo, perché trasmettano un'immagine autentica della matematica e perché non contribuiscano a stereotipi e pregiudizi che rendono la matematica caricaturale e in definitiva allontanano i cittadini di domani da una forma di pensiero che sarà sempre più cruciale, c'è bisogno che presentiamo loro la matematica in un'ottica storica, raccontando la storia del pensiero matematico; che ne facciamo conoscere le connessioni con altre parti della cultura, collegandola all'arte e alla letteratura, all'economia e alla politica, alla finanza e alle scienze sociali, alla tecnica e alle scienze naturali; che ne mostriamo le potenzialità come palestra di un pensiero razionale di cui la nostra società e il singolo cittadino hanno bisogno. E tutto questo dobbiamo farlo prima che diventino maestre e maestri o insegnanti, quando sono ancora in formazione, prima che scelgano la scuola come professione. Perché una loro visione consapevole della disci-

plina possa contribuire a un'accettazione sociale più serena della matematica negli anni a venire.



**Daniele Gouthier:** è autore di manuali per la scuola, di saggi scientifici e di libri di problemi matematici. Dal 1996 è docente di "Comunicare la fisica e la matematica" alla Scuola Internazionale Superiore di Studi Avanzati di Trieste. Si occupa da oltre venticinque anni di comunicazione della matematica e di come scrivere di scienza, facendo ricerca sulla percezione pubblica della scienza, sul rapporto tra matematica e linguaggio, e sul ruolo della comunicazione nella didattica della matematica. È direttore editoriale delle edizioni "Scienza Express". Tra i libri di cui è autore ci sono i romanzi "Ci sono giorni da ricordare" e "Sulle tracce di un sogno" (entrambi editi da bookabook), i saggi "Scrivere di scienza" (Codice), "Il solito Albert e la piccola Dolly" (Springer Italia) e "Le parole di Einstein" (Dedalo), i libri di problemi matematici "Matematica per giovani menti" e "Dar la caccia ai numeri" (entrambi editi da Dedalo) e il manuale per la scuola secondaria di primo grado "Scopri di +" (Lattes editore).

---

# L'analogia: un potente strumento per la divulgazione della fisica

**Tommaso Dorigo**

*Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sez. di Padova*

---

L'analogia è una figura retorica di vasto uso nel linguaggio scritto e parlato. Essa è cucita nel tessuto stesso del nostro linguaggio (a volte mescolata all'iperbole, o altri meccanismi). Spesso non ci rendiamo nemmeno conto di stare ragionando per analogia: frasi come "Vuole bene alla sua gatta come a una figlia", o "Mi sento come se mi fosse crollato il mondo addosso" ci vengono spontanee e ci permettono di comunicare efficacemente in maniera figurata delle caratteristiche della sorgente (la gatta nel primo esempio, o me stesso nel secondo) attraverso il potere evocativo del *target* dell'analogia (la figlia, e rispettivamente me sotto le macerie).

A ben vedere, tutti noi facciamo quotidianamente uso di analogie, piccole o grandi, dichiarate o impercettibili, nel comporre ragionamenti in forma orale o scritta. Sebbene ne siamo meno consci, le utilizziamo costantemente anche in azioni che non passano attraverso una codifica verbale (ad esempio, quando utilizziamo per uno scopo contingente uno strumento progettato per una funzione diversa). L'analogia è infatti un processo cognitivo fra i più potenti, ed è considerato uno degli strumenti fondamentali dell'apprendimento. Attraverso l'analogia siamo in grado di estrapolare le nostre conoscenze e competenze a sistemi più complessi, riducendone la

difficoltà.

Nelle scienze esatte, tuttavia, abbiamo il problema di non poter deformare a piacimento alcune parti del sistema: se trascuriamo l'aspetto quantitativo delle leggi fisiche o delle equazioni matematiche attorno alle quali vorremmo adattare la nostra o altrui intuizione, per renderle più accessibili, solitamente perdiamo una parte importante del potere esplicativo dell'analogia che formiamo. O se in mancanza di meglio ci accontentiamo di analogie imperfette, che descrivono solo parte delle funzionalità o caratteristiche dei concetti dei quali cerchiamo una semplificazione, rischiamo di confondere invece di chiarire.

Diventa quindi utile chiedersi se esista una ricetta, o se vi siano quantomeno delle linee guida, per decidere se un'analogia è utile o meno. Cercherò qui di rispondere alla domanda nell'ambito della divulgazione della fisica delle particelle, un campo in cui ho accumulato una certa esperienza, o quantomeno una consuetudine. Il terreno ove ho raccolto le mie informazioni sul potere e sui limiti di analogie create per spiegare concetti di fisica delle particelle, nel corso degli ultimi 20 anni (vent'anni!), è il mio *blog*, "*A Quantum Diaries Survivor*" [1]. Il blog riceve oltre un milione di visite all'anno. Anche se nel corso degli anni ho lentamente diminuito il mio

impegno divulgativo con quel mezzo, a causa di comprensibili spostamenti nelle mie priorità lavorative, vi pubblico ancor oggi diversi articoli al mese. Uno dei temi ricorrenti in questi articoli è quello di commentare e spiegare ad un pubblico misto (in parte costituito da studenti e ricercatori, ma in predominanza formato da semplici lettori interessati alla scienza ma non forniti di un background specifico in fisica fondamentale) i recenti risultati di fisica provenienti dagli esperimenti ai *colliders*, e altri argomenti a questi correlati. Recentemente, in corrispondenza di un maggiore impegno di ricerca verso tematiche di *computer science*, ho aumentato la frequenza di articoli che discutono nuove tecniche in *machine learning* e intelligenza artificiale, nondimeno mantenendo la fisica fondamentale come l'obiettivo degli sviluppi e delle tecniche discusse.

Negli anni di maggior impegno divulgativo, che hanno coinciso con gli anni in cui i *blog* erano ancora molto di moda, i miei articoli nel *blog* ricevevano in media una dozzina di commenti nei primi giorni dopo la pubblicazione *online*; i commenti talvolta innescavano discussioni interessanti e a volte controverse, che arricchivano il valore dei pezzi pubblicati. I commenti erano e sono lo strumento principe per comprendere quanto i testi siano adatti ai lettori ed al loro *background*, e se i concetti trattati e il linguaggio espositivo siano alla loro portata e rispondano al loro interesse. Spesso infatti i commentatori offrono, direttamente o indirettamente, utili informazioni sull'efficacia di una spiegazione. Ragionando sui metodi più efficaci per spiegare concetti di fisica ostici, in un continuo tentativo di portare per mano i non esperti verso la comprensione dell'importanza e del significato delle misure in fisica delle particelle, mi sono così trovato a ragionare sulla costruzione dell'analogia.

Per iniziare una discussione sull'analogia come strumento di comunicazione, è opportuno partire da una nota frase di Albert Einstein:

*"In the explanation of physics phenomena, everything should be made as simple as possible, but not simpler than that".*

(“Nella spiegazione dei fenomeni fisici, tutto dovrebbe essere reso quanto più semplice possibile, ma non più semplice di così”).

Un pericolo è dunque l'eccessiva semplificazione: nel tentativo di rendere familiare ciò che ci è ostico includiamo nell'analogia troppo poco dettaglio, deteriorando la corrispondenza fra *target* e sorgente e impedendo la comprensione di quest'ultima; o peggio, deformiamo la realtà fisica per far funzionare la figura retorica, asservendo così il fine allo strumento invece che l'opposto. Possiamo mettere Einstein alla prova dei suoi standards citando una analogia di sua invenzione:

*"You see, wire telegraph is a kind of a very, very long cat. You pull his tail in New York and his head is meowing in Los Angeles. Do you understand this? And radio operates exactly the same way: you send signals here, they receive them there. The only difference is that there is no cat."*

(“Vedi, il telegrafo a fili è una sorta di gatto lunghissimo. Tiri la sua coda a New York e la sua testa miagola a Los Angeles. Lo capisci? E la radio opera esattamente nello stesso modo: mandi segnali da qui, e li ricevono lì. L'unica differenza è che non c'è il gatto.”)

Questa analogia è indubbiamente semplice. Ma è semplice quanto serve, o troppo semplice? Questo dipende dagli ascoltatori cui ci si rivolge: per un bambino la spiegazione è perfetta, mentre se offerta agli studenti di un corso di tecnica delle comunicazioni essa risulterebbe imbarazzante. Quindi il grado di complessità di un'analogia, proprio come in generale il livello di una spiegazione, deve essere calibrato opportunamente.

Appare pertanto evidente che bisogna avere ben chiare due cose quando si costruisce un'analogia per spiegare un concetto in fisica: *in primis*, quali siano le competenze dei nostri ascoltatori; e *in secundis*, cosa vogliamo che gli ascoltatori davvero interiorizzino nel venire esposti all'analogia che costruiamo. È dunque utile cercare di riconoscere alcuni fattori che permettano di giudicare se un'analogia è appropriata per i nostri ascoltatori, se permette di raggiungere lo scopo prefisso, o se è troppo complicata, e potenzialmente distrae dall'obiettivo. Possiamo mettere a fuoco questi fattori attraverso l'analisi di un esempio: una analogia ben costruita ma che in

realità non possiede un vero potere esplicativo. Ci viene in aiuto a questo scopo la famosa spiegazione della rottura della simmetria elettrodebole per mezzo del comportamento di commensali ad una tavola imbandita, una analogia dovuta a Abdus Salam, uno dei fisici teorici che hanno originariamente formulato il modello standard delle interazioni elettrodeboli. Immaginiamo dunque di cercare di spiegare come la scelta di uno dei possibili stati di vuoto di un sistema fisico costituito da un doppietto di campi scalari complessi  $\phi = [\phi_1 + i\phi_2, \phi_3 + i\phi_4]$  rompa la simmetria del sistema. Potremmo tentare con il testo seguente:

“Vi trovate a cena e, insieme agli altri commensali, sedete intorno a un tavolo rotondo. Notate che il piatto di verdura si trova a destra del vostro piatto, ma anche a sinistra del piatto del commensale seduto alla vostra destra. Non sapete quale piatto prendere, fino a quando qualcuno prende quello alla propria destra. Ora che la scelta è stata fatta il sistema non è più degenere, e c'è una sola risposta logica a quale sia il vostro piatto di verdura! Similmente, nella Lagrangiana del campo di Higgs esiste una degenerazione, una moltitudine di stati possibili equivalenti, e la scelta di un particolare valore di  $\phi$  determina quale sia la realizzazione fisica del sistema.”

Personalmente ho sempre trovato poco efficace questa analogia, nonostante la eleganza della sua esposizione. Se esaminiamo attentamente il suo utilizzo, infatti, ci risulta chiaro che abbiamo speso forse venti secondi a creare negli ascoltatori l'immagine della tavola imbandita ed a porli di fronte al dilemma di quale piatto di verdura scegliere, implicitamente immedesimandoli nell'instabile vuoto quantistico. Ma cosa abbiamo ottenuto con questa operazione? Abbiamo forse spiegato come avviene questa scelta, o cosa succede ai gradi di libertà che vengono trasferiti dal campo di Higgs alla massa dei bosoni vettori? Queste domande rimangono nell'aria e non trovano risposta, non essendovi nella costruzione alcuna corrispondenza fra i concetti fisici da esse evocati e gli elementi della tavola imbandita. Ciò che abbiamo spiegato è in realtà unicamente in

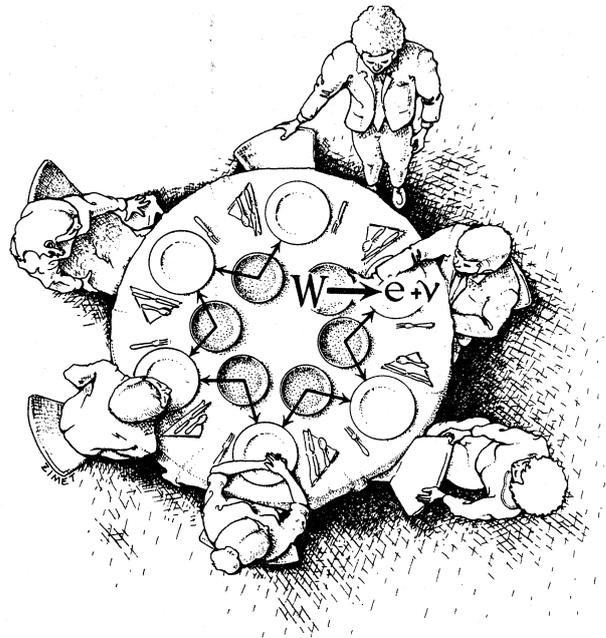


Figura 1

che cosa consiste la rimozione di degenerazione. Ma non serviva certo apparecchiare una tavola per ottenere questo modesto risultato!

È dunque opportuno domandarsi sempre quale sia l'effettivo valore di una analogia. Nella letteratura specifica il valore di una analogia è solitamente identificato con il suo potere predittivo delle caratteristiche incognite della sorgente. Questo si può valutare utilizzando delle proprietà della similarità fra sorgente e *target* che sono legate alla forza dell'analogia che si può trarre fra essi: la rilevanza delle somiglianze alla caratteristica o funzione oggetto dell'inferenza logica, il loro numero, e la loro varietà. Tuttavia, nel caso di applicazioni didattiche, vi sono addizionali unità di misura che forniscono un importante metro valutativo. Ad esempio, risultano critiche la familiarità degli ascoltatori con il *target*, quanto breve ne è la necessaria descrizione, e quanto è nota la parte del *target* oggetto dell'inferenza. Quelli citati sono elementi dipendenti dagli ascoltatori; un elemento più generale è invece quanto effettivamente coincide, in *target* e sorgente, la fenomenologia della parte oggetto dell'inferenza. La somiglianza potrebbe infatti essere solo accidentale, o lessicale, e rendere l'analogia inefficace o sterile.

Nell'esempio della rottura di simmetria, la degenerazione rimossa dalla scelta del piatto o dallo stato di vuoto non possiede caratteristiche in

grado di estendere la deduzione. Dove sono i bosoni di Goldstone rimossi dalla scelta? Sarebbe bello poter dire che il primo commensale li abbia mangiati, ma la cosa non funziona. Per contro, nell'analogia di Einstein vista sopra, oltre al potere predittivo (i segnali si possono propagare tanto attraverso un filo quanto lungo il sistema nervoso di un gatto) la potenza esplicativa giace sia nella familiarità del target quanto nella predicibilità della risposta del gatto (miagolio) alla sollecitazione (tirare la coda). Inoltre la fenomenologia è coincidente, un fatto alquanto sorprendente che impreziosisce la costruzione: si tratta infatti in entrambi i casi, gatto e telegrafo, di segnali elettrici propagati in un filo!

È altresì utile identificare alcuni problemi tipici che analogie non ben costruite possono presentare, e che le rendono inefficaci o poco adatte allo scopo prefisso. In primo luogo, va notato che l'analogia deve avere come obiettivo quello di estendere la nostra comprensione della sorgente attraverso lo studio di un *target* familiare. A volte tuttavia le caratteristiche già note di sorgente e target sono molto simili, mentre quelle che vogliamo spiegare non sono per nulla simili o mal si prestano a una deduzione. Manca in altre parole un vero e proprio potere deduttivo. In secondo luogo, dobbiamo chiederci se è facile concentrarsi sulle caratteristiche oggetto dell'inferenza, o se piuttosto il *target* scelto sia complicato o presenti caratteristiche che rischiano di distrarre l'ascoltatore: in altre parole, l'analogia può non essere economica, e può in tal caso rendere difficile la messa a fuoco delle caratteristiche che ci interessano del target scelto. Un pericolo è anche quello di ricercare troppe caratteristiche simili in sorgente e *target*, portando troppo avanti una buona analogia e distraendoci così dallo scopo originario, rischiando di mancare l'obiettivo che ci eravamo posti.

Possono inoltre esistere controindicazioni di natura esterna ad una altrimenti valida analogia. R. Dawkins nel suo libro "The God Delusion" [2] parla di un "ultimate burqa" che ci ha permesso per secoli di vedere solo una piccola parte del mondo attraverso una fessura; la scienza ha gradualmente aperto questa fessura, portando la speranza di poter un giorno liberarci del tutto dal burqa. Questa analogia ha dei meriti, ma può risultare offensiva per un musulmano:

*caveat emptor*. Un altro esempio viene dallo studio di un ginecologo, il quale nel sicuramente nobile sforzo di spiegare la situazione ad una paziente, si lancia nella confezione della seguente ipotesi: "Immagini che questa stanza sia la sua vagina". La persona che riporta questa frase spiega: "Avrebbe dovuto inventarsi un'analogia che non implicasse l'immaginarsi di stare nella mia vagina. Mi ha preso così alla sprovvista che non riuscivo a ricordare quale muro fosse la mia cervice".

Un'altrimenti buona analogia può risultare imperfetta: una differenza importante fra sorgente e *target* può allora rendere fallaci le conclusioni che se ne derivano, se non se ne limita il dominio di applicabilità. Prendiamo ad esempio la famosa, ed altrimenti fruttuosa, analogia usata per descrivere le interazioni deboli di corrente carica con quelle elettromagnetiche: entrambe agiscono per mezzo dello scambio di un bosone vettore (un fotone nell'elettromagnetismo, o un bosone W nell'interazione debole); questo ci permette di comprendere alcune proprietà della sorgente, ed anche di costruire metodi di calcolo quantitativi in quasi perfetta corrispondenza. Tuttavia l'ipercarica debole non si propaga lungo le linee fermioniche connesse al bosone W emesso o assorbito, come fa invece la carica elettrica; questo fatto potrebbe venir erroneamente trasmesso a chi ci ascolta se non porriamo attenzione a limitare il contesto applicativo dell'analogia utilizzata.

Per concludere, è utile notare come esistano confronti fra sistemi che non sono affatto in relazione di corrispondenza fra essi nella parte su cui si pone l'accento: queste sono false analogie. Il caso più comune si ha quando la proprietà oggetto dell'inferenza o deduzione è l'essenza di ciò che distingue sorgente e *target*. Assumendo erroneamente che in uno stadio vi sia per definizione erba su cui correre, un giocatore potrebbe presentarsi allo stadio del ghiaccio con scarpe da calcio.

\* \* \*

Desidero ora discutere brevemente alcuni esempi di analogie, originali e non, da me utilizzate nel mio *blog* per spiegare concetti di base in fisica delle particelle, identificando quando possibile i loro eventuali elementi di forza e di

debolezza secondo l'approssimativa categorizzazione operata supra. Iniziamo con un concetto piuttosto complicato: l'intrinseca debolezza delle interazioni deboli.

Sappiamo che la grande massa dei bosoni  $W$  e  $Z$  che mediano tali interazioni è la ragione della loro debole intensità: la loro massa impedisce ai bosoni di mediare interazioni di lungo raggio, ed è un parametro che determina l'intensità dell'interazione. Possiamo dunque proporre il testo seguente:

“Per comprendere come un mediatore massivo può essere meno efficace ed agire più debolmente di uno senza massa, confrontate una tazza di cioccolata calda con una tavoletta di cioccolato: il vapore caldo disperde intorno alla tazza molte piccolissime particelle leggere, che si possono facilmente annusare a distanza. Invece la tavoletta può solo rilasciare poche piccole scagliette solide di cioccolato se vi andate molto vicino e inalate con forza. Le scagliette sono più massicce e meno abbondanti dei corpuscoli che evaporano dalla tazza, e sono pertanto incapaci di trasportare lontano il profumo di cioccolata; inoltre, anche a piccola distanza l'odore che si può sentire dalla tavoletta è meno intenso, per via della minor quantità di scaglie rilasciate quando la annusate.”

Prima di discutere pregi e difetti di questa analogia, vediamo come l'ho utilizzata nel *blog*, cercando di spremere il massimo significato possibile.

“Il comportamento dell'odore di cioccolato dalla tazza e dalla tavoletta può essere assimilato al comportamento delle interazioni elettromagnetiche e deboli a bassa energia: le prime appariranno molto più intense. Ora però si immagina di costruire uno *sniffer*, un dispositivo che analizzi l'odore di corpi solidi e liquidi allo stesso modo: la sostanza oggetto del test viene vaporizzata e lo spettro di assorbimento del vapore viene analizzato. Lo *sniffer* troverà che la cioccolata calda e la tavoletta hanno la stessa intensità di profumo. Similmente, le

interazioni elettromagnetiche e deboli diventano egualmente forti ad alta energia, una volta che la massa di particelle di cioccolato o scagliette, ovvero fotoni e bosoni  $W$  e  $Z$ , diventa irrilevante.”

Va osservato come a dispetto del bonus esplicativo della seconda parte di questa analogia, che introducendo un nuovo elemento (lo *sniffer*) cerca di spiegare l'unificazione elettrodebole, sarebbe stato probabilmente meglio fermarsi alla prima parte: ci siamo innamorati troppo dell'analogia e l'abbiamo usata per spiegare più aspetti della sorgente di quanto ci eravamo originariamente proposti. L'analogia ora vista è stata anche criticata per la mancanza di spiegazione del raggio finito dell'interazione forte (che è mediata da gluoni, che pure hanno massa nulla). Quest'ultima non appare tuttavia una critica valida, per lo stesso motivo già citato: una buona analogia non deve per forza spiegare più di quanto previsto.

Accettato che la seconda parte dell'analogia sia troppo spinta, e forse utile solo in un ambito diverso da quello didattico del *blog*, in quanto affronta il concetto troppo complesso dell'unificazione ad alta energia delle interazioni elettrodeboli, concentriamoci sulla sua prima parte. Possiamo innanzitutto presumere un'ottima familiarità dei nostri ascoltatori con il *target*, e una discreta rilevanza delle caratteristiche comuni (emissione di particelle di diversa massa), che però non sono in grande numero o varietà. La fenomenologia (intensità dell'odore/intensità dell'interazione) è invece un punto debole dell'analogia: essa è solo apparentemente riconducibile allo stesso comportamento delle caratteristiche oggetto dell'induzione logica, in quanto l'odore in realtà si ricava da singole molecole comunque vaporizzate, non da interi corpuscoli. L'analogia ha però un buon potere predittivo, ed il *target* è economico. Secondo questi criteri, l'analogia in questione risulta uno strumento ragionevolmente efficace per spiegare il concetto in discussione.

Un secondo esempio dal quale possiamo attingere è la spiegazione del cosiddetto problema della “naturalità” della massa del bosone di Higgs. La massa del bosone di Higgs riceve delle correzioni quantistiche dovute a diagrammi contenenti *loops* di particelle virtuali. Queste correzioni dipendono da un parametro di taglio



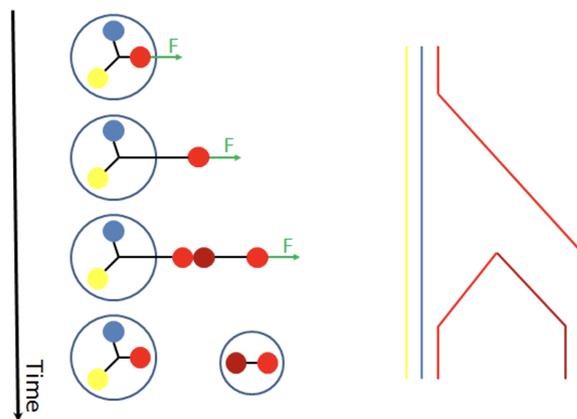
mentre il target sia semplice e potenzialmente familiare agli ascoltatori.

Nel 2012 sottoposi ai lettori del mio *blog* le considerazioni sull'uso delle due analogie ora viste per spiegare il problema della naturalezza. Ne nacque una interessante discussione *online*, a seguito della quale un lettore propose il seguente miglioramento alle versioni proposte dell'analogia in questione:

“Supponiamo che la somma di profitti e perdite di dieci aziende sia pari a dieci euro. Conoscendo solamente questo fatto, e assumendo che i profitti e le perdite a priori siano più o meno egualmente probabili, che dimensioni possiamo stimare per gli incassi di ciascuna compagnia? Ci si potrebbe aspettare degli incassi tipici di banchetti di vendita di limonata! Saremmo invece molto sorpresi se ci dicessero che queste aziende hanno incassi dell'ordine di miliardi di euro ciascuna, in quanto sarebbe in tal caso molto improbabile ottenere una somma pari a un numero così piccolo come 10 euro: verrebbe allora il dubbio che qualcuno abbia messo assieme con molta attenzione la lista di aziende per ottenere di proposito un profitto totale così vicino a zero. I fisici, similmente, sospettano che l'innaturale, quasi perfetto bilanciamento delle correzioni quantistiche alla massa del bosone di Higgs sia dovuto a una struttura nascosta che non abbiamo ancora scoperto.”

È chiaro il vantaggio di questa versione sulle precedenti: oltre a presentare una situazione molto più familiare di una “puntata casuale” o di una collezione di numeri irrazionali, il budget di una azienda, i profitti e le perdite, l'analogia è anche molto semplice e diretta. La creazione di questa analogia dimostra l'efficacia del processo di revisione e l'autovalutazione dei pro e contro dei testi proposti.

Infine, prendiamo in considerazione il tentativo di spiegare il comportamento di quark e gluoni nel protone in analogia con l'estensione di una molla. Va detto che questa è una tentazione naturale per un fisico: il potenziale di interazione del-



**Figura 2:** Il tentativo di estrarre un quark (pallina rossa nel grafico a sinistra) da un protone (formato da tre quarks di colore diverso) per mezzo di una forza  $F$  porta all'allungamento della linea di forza che collega i quarks fra loro. Non appena l'energia investita nell'allungamento diventa sufficiente, essa si trasforma nella massa di una nuova coppia quark-antiquark (terzo diagramma dall'alto). Il nuovo quark torna infine nel protone a rimpiazzare quello rimosso, e la rimanente coppia quark-antiquark si stabilizza in un mesone. Nel grafico a destra viene riportata schematicamente la posizione dei quarks corrispondente alle quattro configurazioni mostrate a sinistra; ogni linea colorata qui rappresenta la propagazione nello spazio-tempo di un quark.

la forza forte cresce con la distanza inter-quark in modo simile all'energia potenziale di una molla. Tuttavia l'analogia è solo parziale. Una molla troppo estesa si deforma, non si rompe; inoltre i suoi estremi non sono parte essenziale del sistema. L'ascoltatore può venire confuso se non comprende il giusto livello al quale l'analogia funziona.

Stabilito che la spontanea analogia fra molla e stringa di interazione forte esibisce degli evidenti limiti, la domanda da porsi in questo caso appare la seguente: cosa vogliamo effettivamente che l'ascoltatore comprenda? Chiaramente vogliamo trasmettere la nozione che i quark sono confinati all'interno degli adroni dalla forza forte, e spiegare in maniera intuitiva a cosa ciò è dovuto. Se mettiamo a fuoco il nostro obiettivo, ci risulta evidente che in questo caso un grafico ben concepito (vedi Fig. 2) può essere molto più efficace dell'analogia nello spiegare i dettagli del comportamento dei quarks. In effetti, fare ricorso

alla visualizzazione grafica dei fenomeni fisici è un'alternativa spesso preferibile alla semplice descrizione e comparazione analogica: con grafici sufficientemente ben progettati e con una attenta descrizione del loro contenuto, si riescono ad evidenziare le caratteristiche da comprendere ed a spiegare in modo semplice concetti apparentemente ostici senza perdere di vista le specificità del sistema fisico in esame.

Il grafico ora visto mi permette di concludere questa breve discussione sottolineando come l'analogia sia uno strumento imprescindibile, ma non l'unico, per spiegare la fisica. Essa è tanto più utile quanto maggiore è la necessità di una semplificazione, ovvero quanto maggiore è il divario fra il livello di preparazione degli ascoltatori e la complessità dei concetti che si vogliono far loro digerire. I pro e i contro di una analogia vanno valutati attentamente di caso in caso, facendo attenzione ad evitare alcuni errori tipici, in particolare, la mancanza di potere predittivo, la scarsa familiarità degli ascoltatori con il *target*, e la imperfezione delle corrispondenze fra sorgente e *target*. Un'auto-valutazione di queste e altre caratteristiche delle analogie che formiamo nella nostra azione didattica è un utile esercizio, che in ogni caso consiglio caldamente.



[1] [http://www.science20.com/quantum\\_diaries\\_survivor](http://www.science20.com/quantum_diaries_survivor)

[2] R. Dawkins: *The God Delusion*, Mariner Books, Boston (2008).



**Tommaso Dorigo:** è un fisico delle particelle elementari. Collabora con gli esperimenti CMS e SWGO, e ha fondato, e dirige, la collaborazione MODE (<https://mode-collaboration.github.io>), che studia l'ottimizzazione del *design* di esperimenti in fisica fondamentale con *deep learning*. Dal 2022 Dorigo è anche presidente dell'organizzazione USERN (Universal Scientific Education and Research Network, <https://usern.org>), un network di 25 mila membri che supporta l'interdisciplinarietà e la diffusione della scienza.

---

# Sfidare l'ansia da matematica con l'aiuto delle scienze cognitive

*Niente nella vita deve essere temuto, solo compreso. Ora è il momento di comprendere di più per temere di meno.*

**Marie S. Curie**

**Luciana Ciringione, Edoardo De Duro, Massimo Stella**

*CogNosco Lab,  
Dipartimento di Psicologia e  
Scienze Cognitive,  
Università di Trento*

---

**C**omunicare la conoscenza scientifica è una sfida complessa, che viaggia su molteplici dimensioni. Si pensi di dover comunicare la scoperta della radioattività: comunicatore e ricevitori si scambiano non solo nozioni scientifiche (sul decadimento), ma anche percezioni emotive (sul fascino della scoperta), esperienze di vita vissuta (da Madame Curie) e ragionamenti logici (mirati a catturare l'attenzione). Questi aspetti realizzano una comunicazione complessa, che però spesso deve passare da aspetti matematici (la legge di decadimento, i modelli atomici). Quando questi concetti inducono ansia disfunzionale, si parla di ansia da matematica: un fenomeno che può essere compreso e ridotto solo grazie ad approcci multidisciplinari, a cavallo tra scienze cognitive, fisico-matematiche e della complessità.

## Introduzione

Comunicare la scienza è un processo complesso. In questo caso l'accezione complesso non è da intendersi come sinonimo di complicato ma piuttosto come un aggettivo che denota una grande presenza di sfaccettature e fenomeni contemporaneamente presenti, i cui esiti non possono essere capiti singolarmente [1]. Le scienze della complessità studiano infatti sistemi come quello della comunicazione scientifica, dove molteplici elementi, fenomeni e processi intervengono insieme nella intricata creazione di nuovi comportamenti, conoscenze e *pattern*. Trovare il modo adeguato di comunicare scienza è qualcosa di complesso perché vuol dire avere a che fare con una serie di processi psicologici attraverso vari livelli, non tutti legati al dominio di riferimento, cioè lo specifico settore scientifico considerato. Comunicare la scienza può essere visto come un caso specifico di atto comunicativo, il quale in generale richiede la ricerca, la selezio-

ne e la produzione di informazioni, da parte di un comunicatore, secondo modalità specifiche, comprensibili e di interesse per i riceventi [2].

### La complessità di chi trasmette conoscenza. Memoria, strategie cognitive e aspetti non-cognitivi

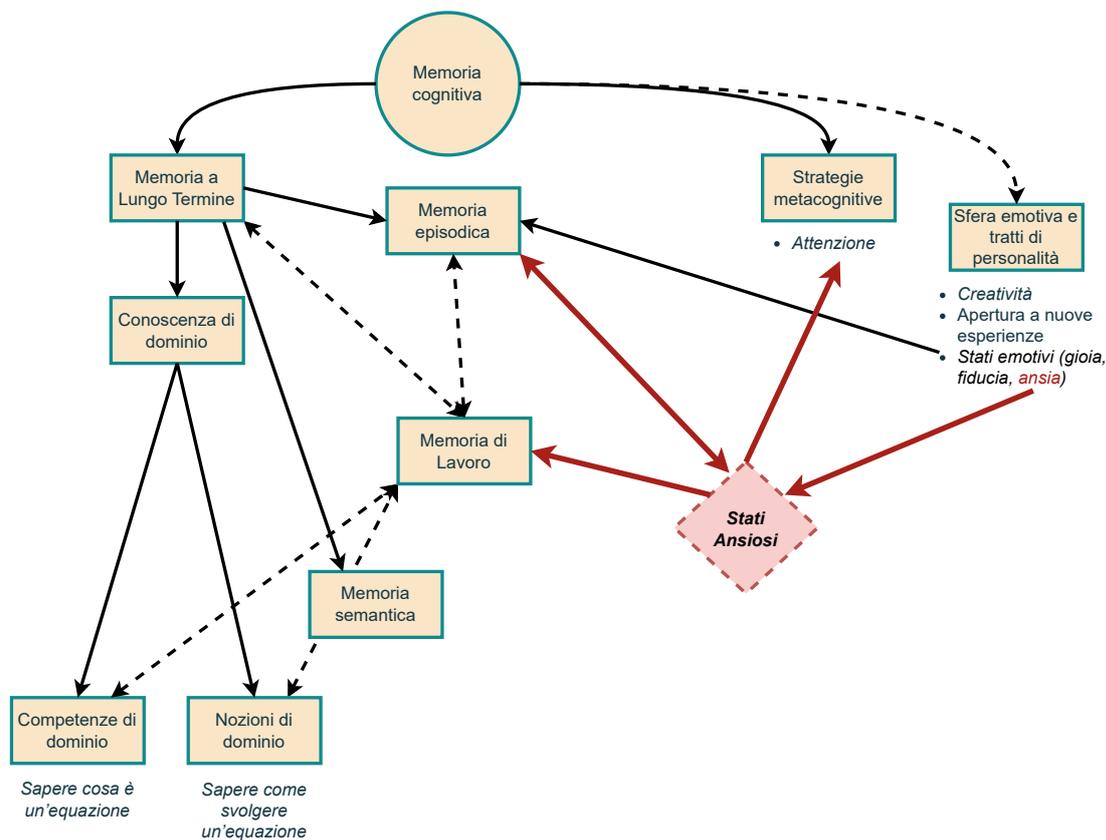
Le scienze cognitive possono offrire anni e anni di evidenza sperimentale e teorica riguardo alcuni processi principali che concorrono al fenomeno complesso della comunicazione scientifica [2, 3]. Infatti, la comunicazione parte con una ricerca di informazioni nella mente del comunicatore, che affronta una serie di operazioni, potenzialmente non in sequenza ma dipendenti tra di loro, elencate qui sotto.

- **Raccolta di nozioni e competenze all'interno della memoria cognitiva**, che è il sistema che immagazzina conoscenza a livello mentale. Comunicare la scienza richiede specificamente accesso a due componenti della memoria cognitiva [3]:
  - (i) la conoscenza di dominio, cioè il *set* di conoscenze legate a un tema specifico,
  - (ii) la memoria esecutiva, cioè una memoria specifica addetta a caricare e manipolare simboli logici.

Ad esempio, comunicare la scoperta delle equazioni di Maxwell richiede il richiamo di nozioni (ad esempio portatori di carica, campi, ecc.) dalla conoscenza di dominio ma anche competenze di manipolazione dei simboli matematici, tramite memoria esecutiva, per eventualmente scrivere le formule delle equazioni. Più nel dettaglio [3, 4], la conoscenza di dominio rappresenta tutte le nozioni concettuali e di contesto che costituiscono la conoscenza che un/a esperto/a avrebbe di un dato argomento. Vanno distinte nozioni di dominio e competenze di dominio: le nozioni costituiscono principalmente ciò che è importante sapere sugli aspetti dell'informazione che si vuole veicolare (ad esempio sapere cosa è un'equazione), mentre le competenze costituiscono tutti gli aspetti utili a contestualizzare, legare

e mettere in pratica le nozioni (ad esempio sapere come si risolve un'equazione).

- **Accesso a nozioni e competenze nella memoria cognitiva**. Tale accesso può essere guidato e/o rafforzato da avvenimenti episodici o autobiografici. Il ricordare eventi, persone o accadimenti specifici può facilitare, ma a volte anche inibire, il richiamo alla mente di determinate nozioni [5]. Diversi filoni di ricerca recenti evidenziano come la memoria autobiografica ed episodica di tali eventi possa interagire fortemente con la conoscenza di dominio e con la memoria esecutiva ma anche con quella semantica, contribuendo al recupero della conoscenza [6].
- **Richiamo e strutturazione delle nozioni e delle competenze caricate tramite linguaggio**. Questo passaggio è fondamentale per attuare una comunicazione scientifica orale o scritta e richiede di richiamare alla mente concetti e idee nella giusta sequenza dalla cosiddetta memoria semantica [6], cioè un sistema cognitivo atto a immagazzinare e produrre qualsiasi tipo di informazione esprimibile tramite il linguaggio.
- **Attivazione di eventuali strategie metacognitive di ricerca dell'informazione**, che facilitino la navigazione dei vari aspetti di memoria cognitiva sopra riportati. Queste strategie possono includere processi affini alla creatività, intesa come l'abilità di connettere informazioni apparentemente remote, o alla curiosità scientifica o ad altre tecniche di richiamo ed esplorazione della conoscenza [3].
- **Interazione con la sfera emotiva e coi tratti della personalità**. Sebbene le emozioni e la loro gestione non ricadano nella definizione formale di cognizione, esse hanno un impatto profondo nel facilitare o inibire il richiamo di informazioni dalla memoria cognitiva [6]. Eventi traumatici possono facilitare la memorizzazione ma anche inibire il richiamo completo di nozioni o competenze, contribuendo così a costruire attitudini di chiusura e negatività. Emozioni positive possono invece contribuire a creare un vero



**Figura 1:** Schematizzazione di alcuni aspetti psicologici e cognitivi che portano alla sintesi di conoscenza comunicata da un dato comunicatore.

e proprio capitale sociale che faccia da scudo a eventi traumatici e faciliti l'acquisizione ma anche il richiamo alla mente di nozioni e competenze anche in situazioni di stress [7]. Infine, tratti della personalità come la l'apertura a nuove esperienze o il nevroticismo [8] possono influire notevolmente sul richiamo di informazioni ma anche sulla loro interiorizzazione, svolgendo dunque un ruolo primario nella comunicazione [3].

Questi aspetti rappresentano un sistema complesso poiché non avvengono in una sequenza rigida e uguale per tutti gli individui [6]. I vari aspetti della memoria e i meccanismi che la regolano creano, invece, un sistema affascinante ma anche profondamente intricato [3].

### **La complessità di chi recepisce conoscenza. La teoria del *dual coding* e il duplice ruolo giocato dall'ansia**

Ad aumentare il grado di complessità della comunicazione scientifica contribuisce anche il fat-

to che la conoscenza, una volta ricordata, strutturata e comunicata dal comunicatore, va poi recepita dai riceventi. Anche l'acquisizione di tale informazione è legata a molteplici processi psicologici [2], tra i quali figurano l'attenzione, l'aspetto emotivo/istintivo e il ragionamento logico/interiorizzante. L'attenzione è un vero e proprio filtro di informazione, messo in atto per ridurre la quantità di conoscenza che viene processata dal ricevente. Porre l'attenzione su particolari aspetti conoscitivi e comunicativi vuol dire dare anche meno rilevanza a informazioni contestuali e dunque facilitare i processi di acquisizione e comprensione dell'informazione comunicata. L'attenzione però richiede grande sforzo e non è una strategia cognitiva che può persistere a lungo nel tempo [3]. Questo vuol dire che una comunicazione scientifica efficace deve essere in grado di rinnovare in modo modulare e iterativo l'attenzione dei riceventi, al fine di facilitare la trasmissione di competenze e nozioni. Il ragionamento emotivo/istintivo e quello

logico/interiorizzante vengono effettuati dai riceventi sulla base di due sistemi cognitivi distinti [2], che lavorano in parallelo ma con tempistiche decisamente differenti. Secondo la teoria del *dual coding* [2], vastamente supportata da evidenze scientifiche, quando un ricevitore si trova di fronte a una nuova porzione di conoscenza si attiva immediatamente il ragionamento emotivo e, più lentamente, anche quello logico. Il secondo tipo di ragionamento può anche essere interrotto/inibito dal primo. Se il ragionamento emotivo si basa su risposte rapide a semplici aspetti della comunicazione, principalmente legati a percezioni visive, uditive ed emotive, il ragionamento logico richiede molto più tempo e un dispendio maggiore di risorse cognitive. I ricevitori possono dunque fare uno sforzo modesto o notevole nel comprendere quanto loro comunicato e le emozioni possono influenzare enormemente il completamento dell'acquisizione di nuova informazione. Emozioni positive, come gioia o fiducia [7], possono indicare come positivo e piacevole un dato pezzo di informazione e quindi promuovere la prosecuzione sia del ragionamento intuitivo che di quello logico, migliorando le probabilità di successo della comunicazione scientifica. Emozioni negative, come il disgusto [7], possono invece interrompere il ragionamento intuitivo e sopprimere anche quello logico, portando ad attitudini di chiusura in cui la comunicazione fallisce.

Un ruolo duale è giocato dall'ansia, che pur si caratterizza come emozione a valenza negativa e quindi spiacevole. Secondo diverse teorie emotive, tra le quali spiccano quelle di Plutchik o Ekman [7], l'ansia è un meccanismo evolutivo utile per fronteggiare minacce. Immaginiamo di essere in una foresta rigogliosa. Suoni placidi e alberi verdeggianti possono tranquillizzare. La consapevolezza di poter potenzialmente incontrare un pericoloso predatore, invece, potrebbe alterare il nostro comportamento. In preda alla paura di poter incontrare una minaccia esterna, il nostro corpo reagirebbe con sintomi spiacevoli (ad esempio secchezza delle fauci, battito cardiaco accelerato, rigidità muscolare, ecc.) che ci porterebbero ad essere più vigili e cauti [8]. L'ansia modificerebbe il nostro comportamento in modo da evitare di incontrare il predatore (ad esempio non fare rumore per non attirare l'at-

tenzione). Non percepire l'ansia potrebbe invece indurci a comportamenti sconsiderati e con esiti potenzialmente nefasti. Pertanto, l'ansia porta ad un vantaggio evolutivo [7,9] e si tratta di un'emozione che continua ad accompagnare anche donne e uomini moderni, anche se ben al riparo da predatori e foreste ignote. Livelli moderati di ansia possono aiutare la vita quotidiana. Percepire un brutto voto come una minaccia imminente può aiutare gli studenti a studiare meglio per un esame. L'ansia di fare una brutta figura può motivare meglio i docenti a preparare una lezione per tempo. Livelli lievi o al più moderati di ansia possono essere funzionali a promuovere comportamenti virtuosi e legati ad ottenere una qualche ricompensa, evitando potenziali esiti negativi. Il problema insorge quando lo stato ansioso è innescato da elementi che non rappresentano delle gravi minacce, generando risposte disfunzionali [4].

Comunicare scienza in presenza di ansia può essere estremamente problematico, soprattutto per quanto riguarda le materie STEM (*Science, Technology, Engineering and Mathematics*). Tali materie si basano in maniera fondamentale sul ragionamento logico ma anche sulla manipolazione di strumenti di misurazione e di modellizzazione matematica [5]. Ad esempio, comunicare agli studenti la scoperta della radioattività da parte di Marie Curie richiede, ad un livello superficiale, delle intenzioni comunicative legate all'episodio in sé (una scienziata scopre un fenomeno naturale sulla base delle proprie ricerche) ma poi a questa narrazione superficiale se ne aggiunge un'altra di natura fisico-matematica, volta a spiegare cosa sia la radioattività in termini di nuclei e processi di decadimento. Questa seconda narrazione, più logica e approfondita, sfrutta dei modelli [1]: rappresentazioni matematiche semplificate del mondo circostante i cui funzionamenti più semplici ma logici permettono di fare previsioni o di comprendere meglio alcuni aspetti, non tutti, purtroppo, della realtà. Comprendere e comunicare questi modelli potrebbe apparentemente essere slegato dal gergo matematico studiato a scuola, eppure gli stessi modelli atomici in grado di spiegare la radioattività sono comunque basati sulla matematica e su conoscenze operative a cavallo tra fisica, matematica e scienze naturali. Identificare dunque il

legame tra narrazione superficiale e modellistica nella comunicazione scientifica è fondamentale: si tratta di un'abilità che si può sviluppare grazie ad un approccio complesso, dove si cerca di mantenere intatti più livelli conoscitivi insieme per dare una migliore rappresentazione della realtà che ci circonda [5]. Mantenere integra la complessità della realtà passa allora anche per la comunicazione di una parte della realtà matematica. Ciò a sua volta richiede la trasmissione e la comprensione di ragionamenti matematici che, tuttavia, potrebbero essere influenzati dall'ansia stessa.

Negli ultimi decenni, la comunità scientifica ha cercato di comprendere meglio tali fallimenti della comunicazione scientifica proprio in relazione all'ansia.

### **Ansia da scienza. Stereotipi, attitudini negative e conseguenze**

L'ansia da scienza è un fenomeno portato alla ribalta da studi a cavallo tra psicologia dello sviluppo e scienze dell'educazione negli anni Settanta [9]. L'ansia da scienza è uno stato ansioso innescato da una percezione distorta della scienza, vista come qualcosa di alieno, che richiede enormi sacrifici per poter essere compreso e padroneggiato. L'ansia da scienza si caratterizza con molteplici sfaccettature, legate alle diverse discipline che incarnano l'approccio scientifico. L'ansia da STEM si concentra sulle discipline più storicamente legate ad una tradizione quantitativa, dove il fallimento è più comune per via di propedeuticità mancanti (ad esempio non saper calcolare un logaritmo può impedire il calcolo di una derivata). Inoltre, in tali discipline, il fallimento assume spesso un ruolo più affine ad una minaccia terribile piuttosto che ad una occasione di apprendimento e di crescita [9]. L'ansia da matematica è un tipo particolare di ansia da STEM e di ansia da scienza, legata ad una percezione distorta della matematica ed esacerbata dalla presenza di molteplici stereotipi [4, 10]

In psicologia sociale, uno stereotipo è un tipo di conoscenza di facile uso e consumo su un gruppo sociale [5]. Anche gli stereotipi offrono un vantaggio evolutivo, analogo a quanto possono offrire livelli lievi o moderati di ansia. Essere a conoscenza di uno stereotipo riguardante una

o più persone comporta la possibilità di avere informazioni a riguardo e di regolare immediatamente, senza effettuare ragionamenti complessi, il proprio comportamento. Tale rapidità è però proprio insita nella semplicità delle informazioni a disposizione e dello stereotipo stesso. A sua volta, questa semplicità comporta considerevoli probabilità di errore. Ad esempio, lo stereotipo "i ragazzi sono più bravi delle ragazze in matematica" non trova riscontro in diverse statistiche compiute a livello internazionale [4], eppure comporta una sorta di informazione parziale che potrebbe ipoteticamente permettere, sbagliando, a qualcuno di prevedere la *performance* accademica in matematica in funzione del genere biologico di un individuo [4]. Altri stereotipi possono legare la personalità o il benessere mentale al successo accademico, ad esempio "genio e sregolatezza vanno insieme, gli scienziati più di successo hanno tutti qualche rotella fuori posto", oppure instaurare meccanismi negativi di insoddisfazione e giustificazione della propria assenza di motivazione, ad esempio "solo i più bravi possono avere successo in matematica". Tutte queste visioni semplicistiche e distorte della realtà possono danneggiare enormemente la comunicazione scientifica, precludendola di fatto a vaste platee di discenti altrimenti perfettamente in grado di intraprendere carriere di successo nel mondo della scienza.

Stereotipi e ansie disfunzionali purtroppo hanno impatti significativi sugli esiti accademici, sul benessere psicologico e anche sullo sviluppo tecnico-scientifico della nostra società [4, 9]. Con l'avvento dell'intelligenza artificiale, della scienza dei dati e col progresso scientifico, saper comprendere e sviluppare tecnologie STEM all'avanguardia avrà un impatto sempre maggiore sul progresso economico di una società, come indicato anche dal finanziamento di 650 milioni di euro svolto dal Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR), destinato a potenziare la didattica STEM (Decreto Ministeriale 65/23). Al fine di non escludere o allontanare risorse eccellenti da percorsi di futuro impatto sociale, cosa possiamo fare? Costruire maggiore consapevolezza sul tema affrontato, concentrandosi sull'ansia da matematica.

## Focus sull'ansia da matematica: Breve excursus storico

L'ansia da matematica viene identificata e descritta per la prima volta nel 1954 da Sorella Mary de Lellis Gough [11]. Con un dottorato di ricerca in matematica conseguito nel 1931, Sorella Gough dedicò buona parte della propria carriera alla didattica della matematica e conìò il termine **mathemaphobia** sulla base delle proprie osservazioni nella pratica didattica. Sorella Gough identificò come episodi negativi legati alla matematica e interazioni sociali distorte avessero lasciato il segno su diversi discenti, in particolar modo in giovani studentesse di grande talento. L'idea di un disturbo d'ansia legato alla matematica venne poi adottato dalla comunità scientifica e sviluppato attraverso molteplici dimensioni, complice anche l'avvento delle scienze cognitive e di nuovi strumenti di indagine quantitativa in ambito psicologico come le scale psicometriche, cioè sequenze di eventi lette e valutate dagli individui. Gli scienziati cognitivi Richardson e Suinn [10] nel 1972 idearono la *Mathematics Anxiety Rating Scale* (MARS), una sequenza di eventi caratterizzanti l'ansia da matematica in relazione al risolvere esercizi matematici o affrontare domande di esame in ambito tecnico-matematico. Leggendo ogni frase, ciascuna relativa a un evento specifico, i rispondenti alla scala psicometrica potevano dire quanto frequentemente si sentissero in ansia ad effettuare una data operazione o in un dato contesto. Analizzando le correlazioni tra i responsi in un gruppo di partecipanti, gli autori dello studio identificarono tre aspetti principali dell'ansia da matematica, ovvero situazionale (ad esempio ansia da esame di matematica), sociale (ad esempio confronto tra pari quando alla lavagna) e cognitivo (ad esempio influenze dell'ansia sulla memoria). Ancora oggi, sebbene riadattato in vari contesti educativi diversi, la MARS è uno degli strumenti psicometrici, di misura di fenomeni psicologici, più usati al mondo. Nonostante lo studio originale del 1972 abbia testato lo strumento MARS su studenti e studentesse al primo anno dei loro studi universitari di matematica, una larga fetta dello studio fu dedicata alla ricerca bibliografica di evidenze nell'ansia da matematica in giovani insegnanti. Questa valutazione sottolinea un

aspetto oggi maggiormente documentato dell'ansia da matematica [4]: quest'ansia non interessa solo i discenti ma anche i comunicatori e può dunque essere trasmessa quando si comunicano le scienze (ad esempio genitori che aiutano i figli a fare i compiti di matematica o in contesti di gruppo classe). L'ambiente sociale riveste un ruolo fondamentale nella trasmissione di tale ansia ad altre persone. Per esempio, commenti estremamente negativi da parte di insegnanti o pari, possono provocare stati di vergogna ed incrementare l'influenza disfunzionale dell'ansia da matematica. In aggiunta, se fin da piccoli si instillano nelle persone giudizi negativi sulla matematica, questo può portare alla creazione di ulteriori stereotipi negativi difficili da sradicare in età adulta [9].

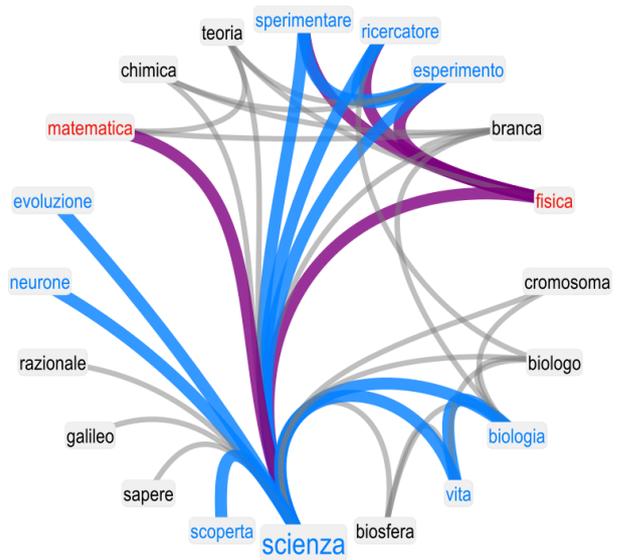
Studi successivi hanno spostato l'attenzione dagli aspetti sociali a quelli cognitivi. L'ansia da matematica rappresenta un sistema complesso [4], interessato dai medesimi livelli di ricerca dell'informazione relativi alla comunicazione scientifica (cf. Figura 1). Livelli eccessivi di ansia da matematica impediscono la raccolta di nozioni all'interno della memoria cognitiva, inibiscono l'attivazione e il recupero delle competenze operative e, crucialmente, riducono considerevolmente il quantitativo di memoria esecutiva massima da poter utilizzare per manipolare simboli logici [3]. Si pensi alla seguente analogia: in un moderno PC, la RAM permette di eseguire programmi e potrebbe essere pensata come la memoria esecutiva di un computer. Se l'ansia da matematica potesse colpire un PC, ipotesi intrigante viste le nuove intelligenze artificiali come ChatGPT, allora, tra le altre cose, essa ridurrebbe enormemente la quantità di RAM a disposizione. Cosa succederebbe ad un PC che normalmente ha 12 giga di RAM e che si ritrovasse improvvisamente ad operare con solo 1 giga di RAM a disposizione? Rallentamenti o blocchi totali. In modo analogo, l'ansia da matematica sottrae importanti risorse cognitive ai discenti [4], che diventano incapaci di caricare e manipolare simboli logici, bloccandosi. Lo stato ansioso può anche ridurre l'attenzione e rendere ancora più difficile per i discenti capire su quale tipo di competenze concentrarsi durante la risoluzione di un problema matematico. Infine, l'ansia da matematica può essere potenziata da memorie autobiografiche

o episodiche negative (ad esempio un docente o un genitore che ha instillato vergogna o ansia disfunzionali), la cui attivazione nella memoria cognitiva rafforza gli stati ansiosi. Tutte queste connessioni rendono l'ansia da matematica un fenomeno complesso e particolarmente rilevante nella comunicazione della scienza, soprattutto in ambito didattico. Come riuscire a mappare la presenza di ansia da matematica, e le sue possibili sorgenti, all'interno di un gruppo classe o di una *data audience*?

## Uno strumento per indagare l'ansia matematica: le Forma Mentis Networks

L'importanza dei fattori individuali nell'indagare e combattere l'ansia matematica rende necessario l'utilizzo di strumenti specifici. Le Behavioral Forma Mentis Networks (BFMN) [12] rappresentano un metodo innovativo finalizzato ad indagare come un individuo o un gruppo di individui associa o percepisce le idee, i.e. struttura la propria *forma mentis* o *mindset*. Adoperando la scrittura di libere associazioni connesse a concetti stimolo (ad esempio "Quali sono le prime tre parole che le vengono in mente quando sente la parola matematica?") è possibile indagare la *forma mentis* di un individuo, ovvero il suo personale modo di associare idee e concetti senza alcuna indicazione specifica. In questo senso, la BFMN è una rappresentazione di associazioni concettuali legate alla memoria semantica ma anche alla conoscenza di dominio e alla memoria autobiografica dell'individuo. Le BFMN sono quindi reti di associazioni concettuali multidimensionali, in grado di riflettere pattern associativi specifici della memoria cognitiva di un singolo comunicatore o ricevente. Un individuo affetto da ansia da matematica, nel task del BFMN, leggendo la parola stimolo "matematica" potrebbe pensare immediatamente a "frustrante", "desolante" e "terribile".

Questo sarebbe già un primo sintomo importante di una percezione distorta ma lascerebbe da parte la percezione emotiva attribuita al concetto stesso. Le BFMN cercano di fare di più, legando la rappresentazione semantica delle associazioni tra concetti a percezioni emotive. Una volta



**Figura 2:** In questa rete forma mentis, il concetto di "scienza" viene connotato positivamente (colore blu) e associato anche a molte altre parole percepite positivamente. Le uniche due eccezioni sono "matematica" e "fisica", che risultano essere gli unici concetti connotati da una valenza emotiva negativa (colore rosso) e associazioni conflittuali (colore viola). Immagine adattata da [12].

raccolte le libere associazioni, all'individuo viene anche chiesto di valutare il livello di piacevolezza/spiacevolezza, ovvero la valenza emotiva [12], di quelle stesse parole scritte. Il risultato sarà una struttura a grafo con connessioni tra ogni parola stimolo e i suoi responsi, tutte fornite e valutate dall'individuo come positive, negative o neutre. Le BFMN rappresentano quindi delle vere e proprie mappe concettuali arricchite da percezioni emotive, dove ogni parola sarà indicata con un colore specifico per indicare il livello di piacevolezza (blu), spiacevolezza (rosso) e neutralità (grigio). Le combinazioni di parole positive (negative, neutre) riflettono associazioni positive/blu (negative/rosse, neutre/grigie). Associazioni tra parole positive e negative esprimono invece associazioni conflittuali, in viola.

L'interattività tra percezioni e associazioni permette di usare le BFMN come strumento psicometrico in grado di adattarsi alla positività, negatività o al conflitto del modo di percepire e associare idee di un individuo. Questo permette di selezionare poche parole stimolo concrete, che però poi portino alla costruzione di una re-



capire la caratterizzazione data a un certo concetto vedendone le associazioni [5]. Pertanto, il set di associazioni costituisce una sorta di contesto semantico, popolato da percezioni positive, neutrali o negative che a loro volta costituiscono un'aura emotiva, attribuita al concetto stesso. Per esempio, "matematica" in Figura 3 possiede un'aura emotiva negativa negli studenti perché associata principalmente a concetti negativi. Tramite un'analisi con dati esterni, lo studio che ha introdotto le BFMN ha anche verificato quantitativamente che concetti negativi circondati da un'aura emotiva negativa suscitano ansia [12]. Dunque, la *forma mentis* ricostruita in Figura 3 è un modo basato su dati cognitivi per evidenziare la presenza di ansia nella percezione della matematica in studenti italiani di liceo.

A cosa è legata questa ansia da matematica? Confrontando la *forma mentis* degli studenti con quella dei ricercatori, emerge subito che i primi non associano la matematica a mezzi di esplorazione del mondo naturale o di acquisizione della conoscenza. La percezione ansiogena degli studenti è invece profondamente incentrata sulle tecniche di calcolo, che, finì a loro stesse, perdono di finalità e vengono percepite come negative o potenzialmente frustranti [12].

L'analisi delle *forma mentis networks* permette quindi di evidenziare stati di ansia da matematica anche in popolazioni di studenti che sono a conoscenza di diverse metodologie e tecniche di calcolo ma finiscono per avere una percezione della matematica stereotipata, dominata dai calcoli. In tale percezione distorta, la matematica non è vista, purtroppo, come strumento fondamentale per conoscere ed esplorare, anche con creatività, il mondo naturale, che è invece il modo in cui ricercatori internazionali percepiscono tale disciplina.

## Strategie per affrontare l'ansia matematica

All'interno di qualsiasi contesto comunicativo, come quello didattico, è possibile far uso delle reti *forma mentis* per inquadrare le emozioni negative associate alle discipline STEM. La psicologia e le scienze cognitive, infatti, possono aiutare non solo a svelare livelli di ansia ma anche

a intervenire attivamente per ridurli o, meglio, prevenirli.

Per superare le barriere poste dalle percezioni negative alla matematica, è essenziale adottare approcci comunicativi che tengano conto delle diverse dimensioni dell'esperienza umana. La comunicazione scientifica non dovrebbe limitarsi a trasmettere dati e fatti, ma dovrebbe anche tener conto delle emozioni e delle percezioni degli individui. Come suggerito da [13], l'uso di storie e narrazioni può rendere i concetti scientifici più accessibili e coinvolgenti, facilitando così la comprensione e riducendo l'ansia associata. Questo può essere fatto attraverso l'uso di metafore, analogie e *storytelling*, che possono rendere i concetti scientifici più accessibili e significativi per un pubblico più ampio.

Bisogna prestare attenzione, quindi, nella comunicazione, innanzitutto a cogliere il contesto entro cui lo scambio di informazioni avviene. Questo permetterà la scelta di un linguaggio appropriato nel far cogliere al meglio all'Altro le informazioni scambiate, evitando ambiguità e presentando associazioni concettuali di interesse e di facile acquisizione [4]. Secondariamente, è utile porre il *focus* sulla base di conoscenza pregressa dell'Altro, soprattutto quando questa relazione non è paritaria, come nel caso mentore – discente. Avere consapevolezza del livello di partenza, e quindi dei bisogni, dell'Altro, permette di avere uno scambio di informazioni non solo più inclusivo, poiché l'altra persona si sente accolta nei suoi bisogni e di conseguenza più favorevole all'apertura, ma anche maggiormente efficace.

Se comunicatore e ricevente riescono a guardare nella stessa direzione, a potenziare lo scambio di vedute e valorizzare l'elemento caratterizzante che ciascuno può portare nello scambio, allora sarà anche più semplice identificare il potenziale nascosto delle informazioni acquisite e di ogni protagonista della comunicazione. Come evidenziato anche da [12], le reti *forma mentis* possono aiutare a visualizzare e comprendere le relazioni complesse tra gli atteggiamenti, le credenze e i comportamenti degli individui, fornendo così un quadro più completo per affrontare le sfide della comunicazione scientifica. La comprensione delle dinamiche comportamentali può favorire lo sviluppo di strategie più efficaci per comunicare

la scienza in modo accessibile e coinvolgente.

In conclusione, superare percezioni distorte e ansie legate alla comunicazione della scienza, soprattutto in ambienti didattici, richiede un impegno collettivo e complesso, da parte dei protagonisti della comunicazione, della didattica e del mondo della ricerca scientifica. Attraverso approcci innovativi e inclusivi, possiamo rendere la scienza più accessibile, comprensibile e, soprattutto, meno ansiogena per ognuno di noi.



- [1] M. Stella: *Mapping the perception of “complex systems” across educational levels through cognitive network science*, International Journal of Complexity in Education, 1 (2020) 1.
- [2] D. Kahneman: *Thinking, fast and slow*, Mac Millan, New York (2011).
- [3] H. L. Roediger III, F. Craik: *Varieties of memory and consciousness: Essays in honour of Endel Tulving*, Psychology Press, Londra (2014).
- [4] M. Stella: *Network psychometrics and cognitive network science open new ways for understanding math anxiety as a complex system*, Journal of Complex Networks, 10 (2022) cnac012.
- [5] M. Stella: *Forma mentis networks reconstruct how Italian high schoolers and international STEM experts perceive teachers, students, scientists, and school*, Education Sciences, 10 (2020) 17.
- [6] L. Renoult, P. S. R. Davidson, D. J. Palombo, M. Moscovitch, Morris, B. Levine: *Personal semantics: at the crossroads of semantic and episodic memory*, Trends in cognitive sciences, 16 (2012) 550.
- [7] J. Lee, C. Kim, Cheongtag: *A Structure of basic emotions: A review of basic emotion theories using an emotionally fine-tuned language model*, Proceedings of the Annual Meeting of the Cognitive Science Society University of California, Merced (2023).
- [8] P. F. Lovibond, S. H. Lovibond, Sydney H: *The structure of negative emotional states: Comparison of the Depression Anxiety Stress Scales (DASS) with the Beck Depression and Anxiety Inventories*, Behaviour research and therapy, 33 (1995) 335.
- [9] J. V. Mallow: *Science anxiety: research and action*, Handbook of college science teaching, Citeseer, Princeton (2006).
- [10] F. C. Richardson, R. M. Suinn: *The mathematics anxiety rating scale: Psychometric data*, Journal of counseling Psychology, 19 (1972) 551.
- [11] Sister M. F. Gough: *Why failures in mathematics? Mathemaphobia: Causes and treatments*, The Clearing House: A Journal of Educational Strategies, Issues and Ideas, 28 (1954) 290.

- [12] M. Stella, S. De Nigris, A. Aloric, C. S. Q. Siew, Cynthia: *Forma mentis networks quantify crucial differences in STEM perception between students and experts*, PloS one, 14 (2019) e0222870.
- [13] K. Dunbar: *How scientists really reason: Scientific reasoning in real-world laboratories*, in R. J. Sternberg & J. E. Davidson (Eds.), The nature of insight. The MIT Press, Boston (1995) p. 365.



**Luciana Ciringione:** È psicologa, psicoterapeuta in formazione e assegnista di ricerca postdoc al CogNosco Lab (Dipartimento di Psicologia e Scienze Cognitive - DIPSCO, Università di Trento). La sua ricerca si concentra su aspetti cognitivi e non-cognitivi di individui con vario tipo di distress psicologico.

**Edoardo De Duro:** È studente magistrale di Scienze Cognitive, indirizzo *human-computer interactions*. Tirocinante e tesista al CogNosco Lab (DIPSCO, Università di Trento), studia il comportamento dei modelli di intelligenza artificiale in ambito *mental health*.

**Massimo Stella:** Professore su chiamata diretta dall'estero e direttore del CogNosco Lab (DIPSCO, Università di Trento). Fisico divenuto poi scienziato cognitivo, si occupa di *knowledge modelling* e sviluppa modelli di psicomelia basati su reti cognitive e intelligenza artificiale.

---

# Termodinamica stocastica: l'ordine nelle fluttuazioni

**Luca Peliti** Santa Marinella Research Institute, Santa Marinella (Roma)

---

**L**a termodinamica stocastica è una teoria che si propone di descrivere il comportamento aleatorio di sistemi di taglia mesoscopica (intermedia fra la taglia atomica e quella macroscopica) in contatto con serbatoi di calore. Essa ha permesso di identificare sorprendenti regolarità di questo comportamento, note come relazioni di fluttuazione. Essa ha inoltre permesso di chiarire gli aspetti termodinamici della manipolazione di informazioni con implicazioni di vasta portata per la teoria dei sistemi biologici e della computazione.

## Introduzione

La termodinamica descrive il comportamento di sistemi macroscopici in equilibrio termico, o che passano da un tale stato di equilibrio ad un altro. Uno degli obiettivi fondamentali della meccanica statistica, come già sottolineato da J. W. Gibbs nel sottotitolo del suo libro del 1902 [1], è la fondazione razionale della termodinamica. Quindi i risultati della meccanica statistica che si incontrano più spesso riguardano corpi macroscopici in equilibrio termodinamico, il cui comportamento è deterministico. In particolare, le fluttuazioni dovute alla natura discreta degli atomi o delle

molecole che costituiscono questi corpi possono essere trascurate. Questo si ottiene formalmente passando al **limite termodinamico**, considerando cioè il limite di corpi localmente omogenei (per esempio, a densità fissata), le cui dimensioni tendono però all'infinito.

Ci si rese conto ben presto che la meccanica statistica implicava che le leggi della termodinamica, in particolare la seconda legge sul fatto che l'entropia di un sistema isolato non può diminuire, debbono essere interpretate statisticamente. Secondo la termodinamica, se, per esempio, si prepara un gas in modo da occupare solo la metà sinistra di un dato recipiente, l'evoluzione ulteriore del sistema lo porterà ad occupare uniformemente tutto il recipiente stesso. Tuttavia, se il gas è costituito, per esempio, da solo 4 particelle, ci sarà una probabilità non nulla (pari a  $2^{-4} = 1/16$ ) di trovare le particelle tutte a sinistra, anche dopo che sia stato raggiunto l'equilibrio. Queste fluttuazioni sono di solito trascurabili a causa del numero enorme di particelle che compongono i sistemi macroscopici, il cui tipico ordine di grandezza è dato dal numero di Avogadro  $N_A \simeq 6.02 \times 10^{23}$ .

Quindi per oggetti piccoli, di taglia intermedia tra quella degli atomi e quella degli oggetti macroscopici, le fluttuazioni dovute all'agitazione termica delle molecole diventano osservabili.

Questo fu sottolineato in particolare da Einstein in uno dei suoi famosi articoli dell' "anno mirabile" 1905 [2]. Einstein partì da un'audace analogia fra una soluzione (in cui le particelle del soluto hanno più o meno la taglia delle molecole del fluido, cioè un diametro dell'ordine di  $10^{-10}$  m) e una sospensione colloidale (in cui le particelle sospese, di solito composte da aggregati di un gran numero di molecole, e sono quindi molto più grandi delle particelle del fluido, dell'ordine di una frazione di micrometro, pari a  $10^{-6}$  m). Per le soluzioni vale la legge di van 't Hoff, per cui la pressione osmotica esercitata dalla soluzione su una parete che blocca il soluto è data dalla stessa espressione della pressione esercitata da un gas perfetto della stessa densità numerica alla stessa temperatura. Poiché la sospensione differisce dalla soluzione solo per la taglia delle particelle, ci aspettiamo che valga un'analogia relazione anche per la sospensione. Ma per esercitare questa pressione, le particelle della sospensione debbono andare a colpire di tanto in tanto le pareti del recipiente. Quindi, per la teoria cinetica, le particelle in sospensione debbono essere animate da un moto risultante dalla loro interazione con le particelle del fluido, a loro volta animate dall'agitazione termica. Questo moto non è altro che il moto browniano, così chiamato perché descritto soddisfacentemente per la prima volta nel 1827 dal botanico Robert Brown, e sulla cui origine c'era stata parecchia discussione fra il tardo XIX e l'inizio del XX secolo.

Non posso fare a meno di ricordare la straordinaria intuizione degli antichi atomisti, riportata da Lucrezio nel *De Rerum Natura*, II, 114-141. Lucrezio suggerisce di meditare sui moti delle particelle di polvere sospese nell'aria, che si vedono turbinare in un raggio di sole entro una camera scura. "In quel disordinato turbinio", dice, "si celano moti invisibili e segreti della materia. Il moto, originato dai principi della materia [gli atomi], ascende ed emerge fino a muovere i corpi che possiamo vedere con i nostri sensi, anche se gli impulsi per cui essi si muovono non ci sono manifesti."

Con un brillante ragionamento, Einstein fu in grado di mettere in relazione le proprietà osservabili del moto browniano con la meccanica statistica, ottenendo un metodo per la valutazione delle dimensioni atomiche. Questo metodo fu

poi utilizzato da Jean Perrin [3] per ottenere delle stime sempre più precise del numero di Avogadro. Si rese evidente in questi studi la natura statistica del secondo principio della termodinamica. Consideriamo una particella browniana sospesa in un fluido. Di tanto in tanto la sua quota aumenterà, trasformando quindi dell'energia sottratta al fluido che la circonda nella sua propria energia potenziale. Questo fatto è in apparente contraddizione con la seconda legge della termodinamica, come espressa da Kelvin e Planck, secondo cui è impossibile che un processo fisico produca come unico effetto l'innalzamento di un peso e il raffreddamento di un serbatoio di calore. Venne subito sottolineato, naturalmente, che non si possono sfruttare queste fugaci violazioni della seconda legge per far muovere un motore, e che esse quindi non costituiscono un controesempio per le leggi della termodinamica.

Lo studio del moto browniano portò allo sviluppo di un insieme di strumenti matematici che permettono di descrivere il comportamento aleatorio (stocastico) di questi piccoli sistemi e di ottenerne le proprietà statistiche. Si annoverano fra queste tecniche le equazioni differenziali stocastiche, come l'equazione di Langevin, la teoria dei processi di Markov, e le diverse equazioni che reggono l'evoluzione della distribuzione di probabilità di questi sistemi, come l'equazione di Fokker-Planck e le equazioni di Kolmogorov. Queste tecniche trovano applicazione anche per descrivere il comportamento dinamico di sistemi all'equilibrio termodinamico.

Più recentemente l'interesse per i sistemi mesoscopici si è ravvivato a causa, in particolare, dello sviluppo di tecniche sperimentali (come le pinzette ottiche) che permettono di eseguire esperimenti su particelle singole. Dato che esperimenti fatti su sistemi identici utilizzando protocolli identici producono risultati diversi a causa delle fluttuazioni, è stato naturale domandarsi fino a che punto si potessero caratterizzare queste fluttuazioni. Questo programma ha portato a fondare la **Termodinamica Stocastica** come una disciplina che descrive il comportamento dinamico di sistemi piccoli (tra il nanometrico al micrometrico), fuori dall'equilibrio, in interazione con serbatoi di calore.

Possiamo riassumere i risultati della termodinamica stocastica come segue.

- Per ciascuno dei concetti fondamentali della termodinamica classica, come lavoro, calore, entropia e produzione d'entropia, è possibile definire dei concetti stocastici omologhi a livello della singola realizzazione dell'esperimento, purché si consideri il sistema d'interesse come un elemento di un insieme ben definito, descritto da un'opportuna distribuzione di probabilità.
- Per un sistema così descritto, c'è una relazione quantitativa fra la produzione d'entropia lungo una data traiettoria nello spazio dei gradi di libertà del sistema e la violazione della simmetria per inversione temporale, cioè il fatto che la probabilità di una data traiettoria differisce da quella della sua immagine per inversione temporale.
- Da questa relazione si possono inferire delle notevoli relazioni di fluttuazione, che permettono in particolare di esprimere alcune quantità d'equilibrio in termini di medie di quantità di non-equilibrio, sperimentalmente accessibili.
- Come conseguenza di queste relazioni, è stato possibile ottenere un certo numero di disuguaglianze che esprimono quantitativamente la minima produzione d'entropia necessaria per mantenere un sistema fuori dall'equilibrio in maniera controllata. Queste relazioni sono note come "relazioni d'incertezza termodinamiche".
- È stato inoltre possibile rendere esplicita la pertinenza termodinamica dei processi di misura e di manipolazione dell'informazione.

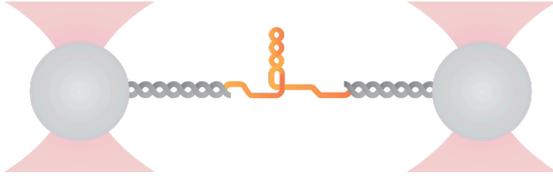
Ci sono diverse presentazioni della termodinamica stocastica (vedi, per esempio, [4], [5] e [6]). In questa nota, cerco di fornirne un'introduzione elementare. Si presume che il lettore abbia dimestichezza con i concetti fondamentali della termodinamica, come temperatura, entropia, energia interna ed energia libera. Si suppone anche che conosca i principi della meccanica statistica elementare, che vengono comunque richiamati in un'appendice. La dinamica dei sistemi mesoscopici verrà descritta mediante catene di Markov a stati discreti, che evolvono in tempo

continuo. Questo permette di ottenere facilmente le leggi di evoluzione delle distribuzioni di probabilità. Potremo quindi vedere come si ottengono le versioni stocastiche di calore, lavoro e produzione d'entropia. Saranno quindi ottenute le relazioni di fluttuazione fondamentali, che esprimono la produzione d'entropia in termini della violazione dell'invarianza per inversione temporale, da cui seguono diverse interessanti relazioni che coinvolgono le fluttuazioni del calore scambiato o del lavoro compiuto sul sistema. Descriverò inoltre le implicazioni di queste relazioni per la termodinamica dell'informazione e da ultimo mostrerò come si possano ottenere le relazioni d'incertezza termodinamiche. Ho cercato di mantenere la matematica al livello più semplice possibile, ma non ho potuto evitare di discutere alcuni spinosi problemi concettuali. Riporto in appendice le idee principali della meccanica statistica classica, la cui conoscenza è necessaria per seguire questo lavoro.

## Relazione di Crooks

Consideriamo ora una situazione come la seguente. Vogliamo descrivere un sistema mesoscopico  $S$ , come una forcina di DNA, in contatto con un sistema  $R$  molto più grande, come la soluzione in cui è immersa la forcina. Il sistema globale  $S \cup R$  è termicamente isolato, ed  $R$  è così grande che può essere considerato come un serbatoio di calore alla temperatura assoluta  $T$ . Possiamo monitorare, istante per istante, la configurazione  $x$  della forcina, e possiamo agire su di essa, per esempio, tramite una pinzetta ottica. Indichiamo con  $\lambda$  l'insieme dei parametri che descrivono la configurazione della pinzetta ottica. In questa situazione il sistema globale  $S \cup R$  non può scambiare calore con l'ambiente, ma manovrando la pinzetta ottica, cioè cambiando il valore di  $\lambda$ , è possibile compiere del lavoro su di  $S$ , e quindi fornire (o sottrarre) energia al sistema globale. Un esempio schematico di questa manipolazione è mostrato in Figura 1.

In un tipico esperimento, si preparano le pinzette in una configurazione iniziale descritta dal valore  $\lambda_0$  del parametro, e si lascia equilibrare la forcina. Poi le pinzette vengono manipolate secondo un protocollo prescritto  $\lambda = (\lambda(t))$  in un intervallo di tempo  $t_0 \leq t \leq t_f$ , durante il quale



**Figura 1:** Schema della manipolazione di una forcina di DNA tramite pinzette ottiche (non in scala). I capi della forcina di DNA sono fissati a due catene di DNA, ciascuna delle quali è fissata a una perla su cui agisce un fascio laser. Le perle sono attratte verso il centro del fascio laser da una forza approssimativamente armonica. Manovrando i fasci laser è possibile avvicinare o allontanare le perle, compiendo così del lavoro sulla forcina.

viene monitorata la configurazione  $x(t)$  della forcina. Indichiamo con  $\mathbf{x} = (x(t))$  (per  $t_0 \leq t \leq t_f$ ) la traiettoria della forcina nel suo spazio delle configurazioni. Supponiamo che  $H(\mathbf{x}; \lambda)$  sia l'energia d'interazione fra le pinzette ottiche e la forcina quando la forcina è nella configurazione  $\mathbf{x}$  e le pinzette nella configurazione  $\lambda$ . Se la forcina sta nella configurazione  $\mathbf{x}$  e  $\lambda$  varia di  $d\lambda$ , il lavoro compiuto sulla forcina è dato da

$$\delta W = \frac{\partial H(\mathbf{x}; \lambda)}{\partial \lambda} d\lambda. \quad (1)$$

Quindi, in un esperimento di questo tipo, in cui il protocollo di manipolazione è dato da  $\lambda$  e la forcina segue la traiettoria  $\mathbf{x}$  nello spazio delle fasi, il lavoro totale compiuto sul sistema è dato da

$$W = \int_{t_0}^{t_f} dt \frac{\partial H(\mathbf{x}(t); \lambda(t))}{\partial \lambda} \frac{d\lambda(t)}{dt}. \quad (2)$$

Dato che il sistema globale è isolato, questa equazione esprime anche la variazione della sua energia interna. Questa espressione dipende dalla particolare traiettoria  $\mathbf{x}$  seguita da S, che non è determinata *a priori*, perché essa dipende non solo dalla configurazione iniziale  $x_0 = x(t_0)$ , ma anche dall'interazione della forcina con la soluzione, su cui l'esperimentatore non ha controllo. Quindi, ripetendo l'esperimento diverse volte con il medesimo protocollo  $\lambda$  in condizioni macroscopicamente uguali, ci aspettiamo di trovare

risultati differenti. Notiamo che questo non avviene se al posto della forcina abbiamo a che fare con un sistema macroscopico come un elastico: in questo caso, in effetti, le fluttuazioni di  $W$  saranno trascurabili rispetto al suo valor medio, per la legge dei grandi numeri. Infatti il valor medio di  $W$  cresce come la taglia del sistema, mentre le sue fluttuazioni crescono tipicamente solo come la radice della taglia.

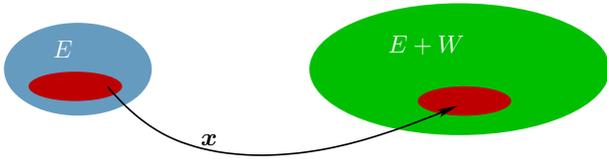
Possiamo adesso utilizzare il postulato di Boltzmann per ottenere delle informazioni sulla distribuzione di probabilità di  $W$ , seguendo un suggerimento di B. Cleuren [7]. Per prima cosa, vogliamo identificare la regione occupata da tutti i possibili stati microscopici del sistema in cui l'energia vale  $E$ . Uno stato microscopico è identificato dalla collezione dei vettori posizione  $\mathbf{r}_\alpha$  e dei vettori quantità di moto  $\mathbf{p}_\alpha = m_\alpha \mathbf{v}_\alpha$  per ciascuna particella  $\alpha$ , dove  $\mathbf{v}_\alpha$  è la sua velocità e  $m_\alpha$  la sua massa. Si preferisce identificare lo stato di moto di una particella  $\alpha$  mediante la sua quantità di moto  $\mathbf{p}_\alpha$ , piuttosto che mediante la sua velocità  $\mathbf{v}_\alpha$ , perché nello spazio così ottenuto vale il teorema di Liouville, che descriveremo fra poco. Questo spazio è detto "spazio delle fasi".

Allora, secondo il **postulato di Boltzmann**, l'entropia di un sistema all'equilibrio la cui energia interna vale  $E$  è espressa in termini del volume  $|\Gamma(E)|$  dello spazio delle fasi occupato da microstati di energia pari (o molto vicina) a  $E$ :

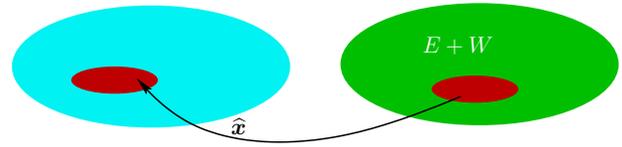
$$S(E) = k_B \ln |\Gamma(E)|. \quad (3)$$

Identifichiamo quindi la regione dello spazio delle fasi del sistema globale che soddisfa questa condizione, dove  $E$  è l'energia interna iniziale, prima che cominci la manipolazione. Questa regione è indicata con un'ellisse celeste nella Figura 2 (a sinistra).

All'interno di questa regione indichiamo con un'ellisse rossa la regione  $\Gamma_0$  degli stati microscopici che permettono al sistema, sotto la manipolazione  $\lambda$ , di percorrere la traiettoria  $\mathbf{x}$ . Alla fine della manipolazione l'energia interna totale vale  $E + W$ , dove  $W$  è il lavoro aleatorio compiuto sul sistema. Indichiamo con un'ellisse verde la regione  $\Gamma(E + W)$  degli stati microscopici dell'insieme globale la cui energia interna totale vale  $E + W$ . L'entropia corrispondente è data da  $S(E + W) = k_B \ln |\Gamma(E + W)|$ . All'interno



**Figura 2:** Manipolazione diretta. A sinistra, volume degli stati microscopici del sistema globale  $S \cup R$  corrispondenti all'energia totale  $E$  (celeste) in cui è contenuta la regione delle condizioni iniziali tali che il sistema  $S$  percorra la traiettoria  $x$  (rossa). A destra, volume degli stati microscopici corrispondenti all'energia totale  $E + W$  (verde) al cui interno sono gli stati finali ottenuti dell'evoluzione del sistema globale a partire dalle condizioni iniziali nella regione rossa.



**Figura 3:** Manipolazione inversa. La regione verde rappresenta tutti gli stati del sistema globale, con energia interna pari a  $E + W$  e valore  $\lambda_f$  del parametro  $\lambda$ . La regione rossa rappresenta gli stati finali del sistema globale, ottenuti al tempo  $t_f + \tau_{eq}$ , con velocità invertita. Con queste condizioni iniziali,  $S$  percorre l'inversa temporale  $x$  della traiettoria seguita nel caso della Figura 2 se, per  $\tau_{eq} \leq t \leq \tau_{eq} + t_f - t_0$ , le pinzette vengono manipolate secondo il protocollo inverso  $\hat{\lambda}$ .

di questa regione indichiamo con un'ellisse rossa la regione  $\Gamma_f$  degli stati microscopici che si ottengono come stati finali dell'evoluzione dell'insieme totale, quando il sistema percorre la traiettoria  $x$ . Queste regioni sono mostrate a destra nella Figura 2.

Adesso, il **teorema di Liouville**, che è uno dei teoremi fondamentali della meccanica statistica, dice che il volume dello spazio delle fasi corrispondente a questi stati finali è esattamente uguale al volume degli stati iniziali:

$$|\Gamma_f| = |\Gamma_0|. \quad (4)$$

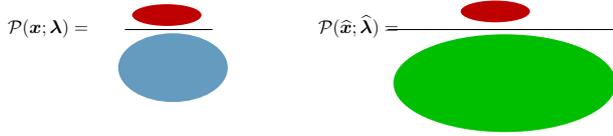
Quindi il volume delle due ellissi rosse è uguale, mentre il volume della regione verde è diverso (e, come vedremo, di solito più grande) di quello della regione celeste. Questo teorema è richiamato in appendice .

Una delle obiezioni più importanti all'interpretazione meccanica dell'entropia sviluppata da Boltzmann è **paradosso della reversibilità** (*Umkehrreinwand* in tedesco), dovuto al suo mentore e amico J. J. Loschmidt. Secondo la termodinamica, esistono dei processi naturali per cui l'entropia di un sistema isolato può aumentare, mentre non esistono processi per cui possa diminuire. Supponiamo che l'entropia sia una quantità che può essere espressa in termini dello stato microscopico  $\xi = ((r_1, p_1), \dots, (r_N, p_N))$  di un sistema di  $N$  particelle, dove  $r_\alpha$  è la posizione della particella  $\alpha$  e  $p_\alpha$  la sua quantità di moto. Supponiamo che esista un processo per cui partendo da uno stato iniziale  $\xi_0$  con entropia

$S(\xi_0) = S_0$  si raggiunge, dopo un certo tempo  $\tau$ , uno stato  $\xi_f = ((r_1^{(f)}, p_1^{(f)}), \dots, (r_N^{(f)}, p_N^{(f)}))$  con entropia  $S(\xi_f) > S_0$ . D'altra parte, le equazioni della meccanica sono reversibili: in altri termini, se lo stato  $\xi_f$  può essere raggiunto a partire dallo stato  $\xi_0$  in un tempo  $\tau$ , consideriamo lo stato  $\hat{\xi}_f = ((r_1^{(f)}, -p_1^{(f)}), \dots, (r_N^{(f)}, -p_N^{(f)}))$ , ottenuto invertendo le velocità di tutte le particelle nello stato  $\xi_f$ . Per la reversibilità delle equazioni del moto, dopo un intervallo di tempo di durata  $\tau$  il sistema si troverà nello stato  $\hat{\xi}_0$  che differisce da  $\xi_0$  solo perché le velocità di tutte le particelle sono invertite. È ragionevole assumere che l'entropia  $S(\hat{\xi}_0)$  sia uguale a quella di  $\xi_0$ . Ma quindi debbono esistere dei processi naturali che permettono all'entropia di diminuire da  $S_f$  a  $S_0$ . La risposta di Boltzmann a questo argomento è che questi processi esistono effettivamente, ma avvengono con una probabilità estremamente più piccola dei processi per cui l'entropia aumenta.

Cerchiamo di applicare questo ragionamento al nostro caso (Figura 3). Supponiamo di essere partiti al tempo  $t_0$  con la pinzetta disposta nella configurazione  $\lambda_0$  e con la forcina in equilibrio con la riserva, con un'energia interna totale pari ad  $E$ , come nel caso della Figura 2. Manipoliamo la forcina tramite la pinzetta ottica secondo il protocollo  $\lambda$  fino al tempo  $t_f$ , e poi aspettiamo un ulteriore intervallo di tempo  $\tau_{eq}$ , finché la forcina e la riserva sono equilibrate. Se il lavoro compiuto sulla forcina durante la manipolazione vale  $W$ , il sistema occupa la regione dello spazio delle fasi identificato dal valore totale  $E + W$  dell'energia interna, e dal valore  $\lambda_f$  della configurazione

della pinzetta ottica. Nel suo interno, l'ellisse rossa denota la regione occupata da tutti gli stati finali (al tempo  $t_f + \tau_{\text{eq}}$ ) delle traiettorie nello spazio delle fasi per cui la forcina ha percorso la traiettoria  $x$ .



**Figura 4:** Valutazione delle probabilità della traiettoria  $x$  e della sua inversa  $\hat{x}$  in termini dei rapporti fra i volumi delle regioni di stati microscopici.

Adesso immaginiamo di invertire le velocità di tutte le particelle del sistema globale. Per la reversibilità delle equazioni del moto, il sistema incomincerà a ripercorrere all'indietro l'evoluzione che lo ha portato da  $t_f$  a  $t_f + \tau_{\text{eq}}$ . Dopo un tempo  $\tau_{\text{eq}}$ , cominciamo a manipolare la pinzetta ottica, variando  $\lambda$  secondo il protocollo  $\hat{\lambda}$  inverso temporale del protocollo di andata  $\lambda$ . Questo protocollo è definito dalla relazione

$$\hat{\lambda}(\tau_{\text{eq}} + t - t_0) = \lambda(\hat{t}), \quad t_0 \leq t \leq t_f, \quad (5)$$

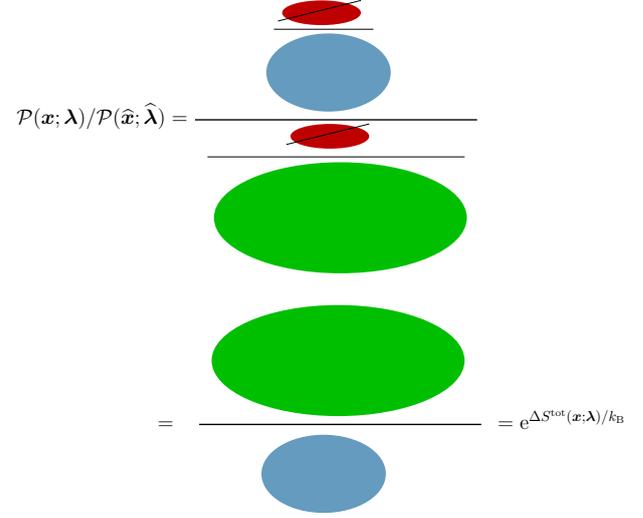
dove

$$\hat{t} = t_0 + t_f - t. \quad (6)$$

Al tempo  $\tau_{\text{eq}} + t_f$ , la pinzetta ottica sta nella configurazione  $\lambda_0$ . Le configurazioni del sistema globale occupano una regione dello spazio delle fasi (indicata dall'ellisse celeste in Figura 3) il cui volume, per il teorema di Liouville, è uguale a  $|\Gamma(E + W)|$ . Al suo interno, la regione indicata dall'ellisse rossa rappresenta gli stati finali delle traiettorie originate dalla corrispondente ellisse rossa entro la regione  $\Gamma(E + W)$ .

Valutiamo adesso il rapporto delle probabilità di  $x$  e  $\hat{x}$ . La probabilità  $P(x; \lambda)$  di  $x$  con il protocollo  $\lambda$  è data dal rapporto fra il volume della regione rossa e di quella celeste in Figura 3, come mostrato in Figura 4. Analogamente, la probabilità  $P(\hat{x}; \hat{\lambda})$  di  $\hat{x}$  (con il protocollo inverso) è data dal rapporto fra il volume della regione rossa e di quella verde in Figura 2. Ma questi volumi sono gli stessi che per la Figura 3, perché l'inversione delle velocità non cambia il volume. Prendendo il rapporto fra queste due probabilità, il volume della regione rossa si cancella fra numeratore e denominatore, e rimaniamo con il rapporto fra i

volumi della regione verde e quella celeste, che, per il postulato di Boltzmann, è pari a  $e^{\Delta S^{\text{tot}}/k_B}$ . Questa conclusione è mostrata in Figura 5.



**Figura 5:** Valutando il rapporto fra la probabilità della traiettoria  $x$  e quella della sua inversa temporale  $\hat{x}$ , si ottiene il rapporto dei volumi delle regioni  $\Gamma(E + W)$  e  $\Gamma(E)$ . Per il postulato di Boltzmann, questo rapporto vale  $e^{\Delta S^{\text{tot}}/k_B}$ .

Bisogna tenere presente che la variazione di entropia totale  $\Delta S^{\text{tot}}$  che compare in questa espressione dipende dalla particolare traiettoria  $x$  che stiamo considerando, o, più esattamente, dal valore  $W$  del lavoro ad essa associato. Abbiamo così ottenuto la relazione

$$\frac{P(x; \lambda)}{P(\hat{x}; \hat{\lambda})} = e^{\Delta S^{\text{tot}}(x; \lambda)/k_B} \quad (7)$$

dove abbiamo esplicitato la dipendenza dalla traiettoria  $x$  e dal protocollo  $\lambda$  e dalle corrispondenti inverse temporali. Raggruppando tutte le traiettorie  $x$  a cui corrisponde uno stesso valore di  $W$ , e tenendo presente che il valore di  $W$  per  $\hat{x}$  (sotto il protocollo inverso  $\hat{\lambda}$ ) vale  $-W$ , otteniamo la relazione

$$\frac{P(W; \lambda)}{P(-W; \hat{\lambda})} = e^{\Delta S^{\text{tot}}(W; \lambda)/k_B}. \quad (8)$$

L'equazione (7) è una delle relazioni fondamentali della termodinamica stocastica, ed è nota come **relazione di Crooks**.

## Relazione di Jarzynski

Possiamo sfruttare la relazione di Crooks per valutare la differenza di energia libera della forcina fra gli stati d'equilibrio caratterizzati dai valori  $\lambda_0$  e  $\lambda_f$  dei parametri delle pinzette. Questa quantità è interessante per valutare la stabilità della forcina, o l'importanza degli scambi d'energia necessari per manipolarne la configurazione. Supponiamo, per esempio, che con  $\lambda = \lambda_0$  le pinzette siano così vicine che la forcina stia nello **stato chiuso**, in cui nucleotidi complementari sono appaiati e legati da legami idrogeno, mentre per  $\lambda = \lambda_f$  le pinzette sono lontane e costringano la forcina a rimanere aperta. Per valutare la differenza  $\Delta F$  di energia libera tra questi stati potremmo utilizzare la relazione termodinamica

$$\Delta F = \Delta E - T \Delta S, \quad (9)$$

tenendo conto del primo principio della termodinamica, secondo cui la differenza di energia interna  $E$  del sistema è data da

$$\Delta E = W - Q, \quad (10)$$

dove  $W$  è il lavoro compiuto sul sistema, e  $Q$  è il calore ceduto dal sistema alla riserva.<sup>1</sup> Si ha inoltre

$$-T \Delta S = Q_{\text{rev}}, \quad (11)$$

dove  $Q_{\text{rev}}$  è il calore ceduto alla riserva in una trasformazione reversibile. Otteniamo così

$$\Delta F = W_{\text{rev}}, \quad (12)$$

dove  $W_{\text{rev}}$  è il lavoro compiuto sul sistema in una trasformazione reversibile che passi da  $\lambda = \lambda_0$  a  $\lambda = \lambda_f$ .

Per utilizzare questa relazione è però necessario essere in grado di compiere delle trasformazioni reversibili, in pratica, estremamente lente, tali da permettere alla forcina di equilibrare ad ogni passo. Data la piccolezza del sistema, questa condizione non è effettivamente realizzabile.

Tuttavia possiamo sfruttare la relazione di Crooks (8) e il primo principio (10) (che vale per tutte le trasformazioni, non solo quelle re-

versibili) nel modo seguente. Sostituendo (10) nella (9) otteniamo

$$\Delta F = W - Q - T \Delta S, \quad (13)$$

dove  $\Delta S$  è la variazione di entropia di  $S$ . D'altra parte, supponendo che la riserva  $R$  sia all'equilibrio, la variazione di entropia della riserva è data da

$$\Delta S^{(R)} = \frac{Q}{T}. \quad (14)$$

Otteniamo così

$$\begin{aligned} \Delta F &= W - T (\Delta S^{(R)} + \Delta S) \\ &= W - T \Delta S^{\text{tot}}. \end{aligned} \quad (15)$$

Sostituendo nella (8) abbiamo

$$\frac{P(W; \boldsymbol{\lambda})}{P(-W; \hat{\boldsymbol{\lambda}})} = e^{(W - \Delta F)/k_B T}, \quad (16)$$

che possiamo riscrivere nella forma

$$P(W; \boldsymbol{\lambda}) e^{(-W + \Delta F)/k_B T} = P(-W; \hat{\boldsymbol{\lambda}}). \quad (17)$$

Integrando rispetto a  $W$ , e considerando che l'integrale al secondo membro vale 1 per la normalizzazione della distribuzione di probabilità, otteniamo

$$\int dW P(W; \boldsymbol{\lambda}) e^{-W/k_B T} = e^{-\Delta F/k_B T} \quad (18)$$

Questa equazione è nota come **relazione di Jarzynski**.

Possiamo sfruttare questa relazione per valutare  $\Delta F$  nella maniera seguente. Definiamo un protocollo opportuno  $\boldsymbol{\lambda}$ , con  $\lambda(t_0) = \lambda_0$  e  $\lambda(t_f) = \lambda_f$ . Poi valutiamo  $W$  con questo protocollo un gran numero di volte, stando attenti ogni volta a lasciare equilibrare la forcina con le pinzette nella configurazione iniziale dettata da  $\lambda_0$ . Otteniamo così, in  $\mathcal{N}$  esperimenti svolti in condizioni identiche,  $\mathcal{N}$  valori  $W_k$ . Possiamo allora ottenere una stima di  $\Delta F$  dalla relazione

$$\begin{aligned} \Delta F &= F(\lambda_f) - F(\lambda_0) \\ &\simeq -k_B T \ln \left[ \frac{1}{\mathcal{N}} \sum_{k=1}^{\mathcal{N}} e^{-W_k/k_B T} \right]. \end{aligned} \quad (19)$$

In pratica è più conveniente sfruttare la relazione (17) in quest'altro modo. Vediamo che se

<sup>1</sup>Questa è la convenzione utilizzata di solito in termodinamica stocastica, che è l'esatto contrario della convenzione abitualmente usata in termodinamica.

$W = \Delta F$  si ha  $P(W; \lambda) = P(-W; \hat{\lambda})$ . Quindi si possono eseguire un gran numero di esperimenti, costituiti prima da una manipolazione **in avanti**, seguendo il protocollo  $\lambda$ , e poi (dopo aver lasciato equilibrare il sistema nella configurazione dettata da  $\lambda_f$ ) da una **all'indietro**, seguendo il protocollo  $\hat{\lambda}$ . Dall'istogramma dei valori di  $W$  in avanti e di  $-W$  all'indietro possiamo valutare dove i valori delle rispettive probabilità sono uguali. Il punto in cui questo accade dà una stima di  $\Delta F$ .

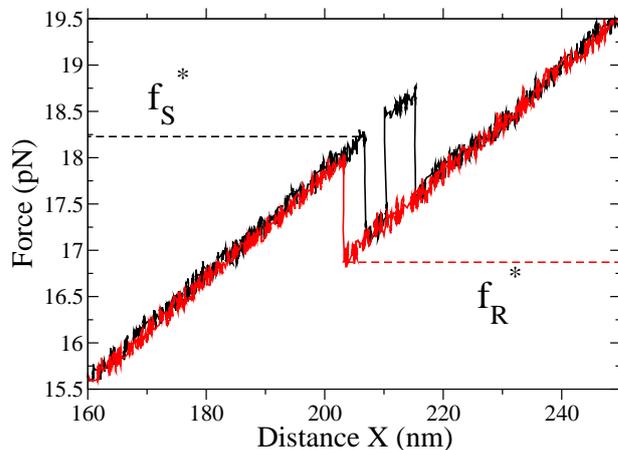
Come esempio di applicazione di questa tecnica, consideriamo l'esperimento descritto in [8]. Si tratta di valutare la differenza di energia libera per una forcina di DNA lunga 46 nucleotidi secondo la tecnica che abbiamo appena descritto. In questo caso la forcina è attaccata, tramite un breve tratto di DNA, da una parte a una piccola biglia su cui agisce un raggio laser come trappola ottica, e dall'altra a un'altra biglia che è tenuta ferma da una micropipetta. In Figura 6 vengono mostrate le curve forza applicata (misurata dalla distanza fra la biglia e il centro della trappola ottica) in funzione della distanza fra il centro della trappola ottica e la punta della micropipetta. Il protocollo in avanti corrisponde all'estensione (*stretching*, S), da circa 15.5 pN a 19.5 pN, ed è rappresentato dalla curva in nero. Il protocollo all'indietro corrisponde quindi al ripiegamento (*releasing*, R) della forcina su sé stessa, ed è rappresentato dalla curva rossa.

Diverse traiettorie, a velocità differenti, sono mostrate in Figura 7. Si vede chiaramente come le fluttuazioni e l'isteresi siano più piccole per protocolli più lenti (a destra) che per protocolli veloci (a sinistra).

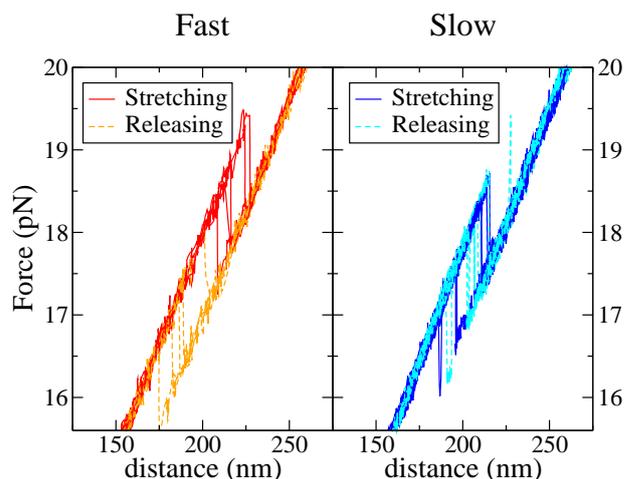
L'analisi della distribuzione  $P(W)$  del lavoro è mostrata in Figura 8.

Vale la pena di sottolineare alcune delle conseguenze della relazione di Jarzynski:

1. Quanto più il protocollo di manipolazione diventa lento, tanto più la distribuzione di  $W$  diventa stretta, e la sua media si avvicina a  $W_{rev}$ , corrispondente a una trasformazione reversibile. La stocasticità di  $W$  appare a causa del tempo finito in cui avviene la manipolazione.
2. Poiché la funzione esponenziale è monotona, la relazione di Jarzynski ha per consequen-

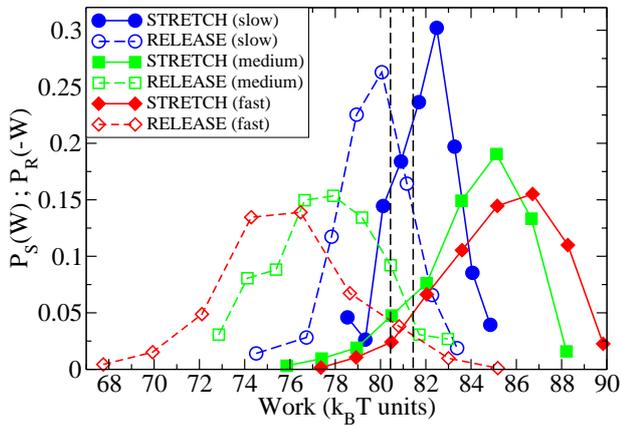


**Figura 6:** Esempio di traiettorie per una manipolazione in avanti e all'indietro di una forcina di DNA [8]. La forza (in pN) è riportata in funzione della separazione fra il centro della trappola ottica e la punta della micropipetta (in nm). La curva nera corrisponde all'estensione, e quella rossa al ripiegamento. Le linee orizzontali tratteggiate identificano le forze di apertura ( $f_S^*$ ) e chiusura ( $f_R^*$ ) della forcina in ciascuna fase.



**Figura 7:** Esempi di traiettorie nel piano forza-distanza per una manipolazione in avanti e all'indietro di una forcina di DNA [8]. La forza (in pN) è riportata in funzione della separazione fra il centro della trappola ottica e la punta della micropipetta (in nm). A sinistra, la velocità di estensione è pari a 200 nm/s, a destra a 25 nm/s, corrispondenti rispettivamente a velocità di carico di 8, 1 e 1, 0 pN/s. Le linee più scure corrispondono alla fase di estensione, quelle più chiare alle fasi di rilascio.

za che deve esserci una probabilità finita di osservare valori di  $W$  inferiori a  $\Delta F$ . Per la (15) questo implica che c'è una probabilità finita che la variazione totale di entropia



**Figura 8:** Istogrammi del lavoro  $W$  compiuto su tre forcine di DNA a tre diverse velocità [8]. Le linee continue corrispondono alla fase di estensione, quelle tratteggiate rappresentano l'istogramma di  $-W$  in fase di ripiegamento. Gli istogrammi si sovrappongono in prossimità del valore stimato di  $\Delta F$ , pari a circa  $81 k_B T$ .

$\Delta S^{\text{tot}}$  sia negativa. Possiamo quindi osservare delle violazioni transitorie del secondo principio della termodinamica.

3. Tuttavia, data la **relazione di Jensen**, secondo cui, per qualunque variabile aleatoria  $X$  si ha

$$\int dX P(X) e^X = \langle e^X \rangle \geq e^{\langle X \rangle}, \quad (20)$$

dove  $\langle X \rangle = \int dX P(X) X$  è la media di  $X$ , si ha

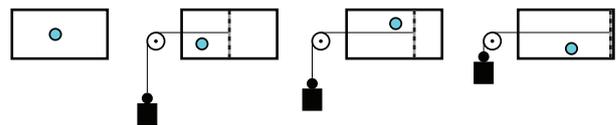
$$\langle W \rangle = \int dW P(W; \lambda) W \geq \Delta F, \quad (21)$$

che implica  $\langle \Delta S^{\text{tot}} \rangle \geq 0$ , in accordo con la termodinamica classica. Vediamo quindi che il secondo principio vale in media, invece di essere una prescrizione assoluta. Questo conferma la risposta di Boltzmann all'argomento di Loschmidt.

## Termodinamica dell'informazione

Fin qui abbiamo supposto che il protocollo  $\lambda$  sia definito una volta per tutte. Tuttavia possiamo applicare protocolli diversi a seconda dello stato di  $S$ . Nel 1929 Leo Szilard (noto fra l'altro per avere scritto il testo della lettera di Einstein a Roosevelt che fece iniziare il Progetto Manhat-

tan) mostrò come si potesse, in linea di principio, violare il secondo principio della termodinamica manipolando un sistema microscopico mediante un protocollo dipendente dallo stato [9]. La sua idea ricorda quella del "diavoleto di Maxwell", che, essendo capace di seguire ogni molecola di un gas nel suo corso, sarebbe in grado di separare le molecole con più energia da quelle con meno energia in un gas, creando così una differenza di temperatura dove prima non ce ne era. Nel caso di Szilard, si considera un gas costituito da una sola particella, contenuto in un cilindro, a sua volta in contatto con un serbatoio di calore alla temperatura  $T$ . Si suppone che il cilindro possa essere diviso in due da una parete mobile. A questo punto, si identifica la metà in cui si trova la molecola. Si attacca quindi un peso alla parete mobile dalla parte corrispondente, e si lascia espandere (reversibilmente) il gas, finché la parete mobile non viene ad adagiarsi sul fondo del cilindro. In questa espansione il peso viene sollevato a spese del calore sottratto dal serbatoio. Alla fine dell'operazione, il collegamento al peso viene rimosso, e anche la parete mobile viene tolta dal cilindro. Siamo così apparentemente tornati alla situazione iniziale: solo una certa quantità di calore è stata sottratta al serbatoio, e trasformata in una variazione dell'energia potenziale del peso. Questa procedura è illustrata in Figura 9.



**Figura 9:** Macchina di Szilard. Un gas costituito da una sola particella è contenuto in un cilindro di volume  $V_0$  a contatto con un serbatoio di calore alla temperatura  $T$ . Il cilindro viene separato in due parti uguali mediante una parete mobile, e si identifica la posizione della particella: un peso viene collegato alla parete mobile dalla parte della particella. Si lascia quindi espandere reversibilmente il gas, facendo sollevare il peso a spese del calore sottratto al serbatoio. Il processo finisce quando la parete mobile tocca l'altra parete del cilindro. A questo punto il peso viene scollegato e la parete mobile viene rimossa.

Possiamo valutare la quantità massima di lavoro  $W$  che si può estrarre da un sistema di questo

tipo sfruttando l'equazione di stato dei gas, secondo cui un gas di  $N$  particelle contenuto in un recipiente di volume  $V$  alla temperatura  $T$  esercita una pressione pari a

$$p(N, V, T) = \frac{N k_B T}{V}. \quad (22)$$

Nel nostro caso  $N = 1$ , e  $V$  varia da  $V_0/2$  a  $V_0$ , dove  $V_0$  è il volume del recipiente. Il lavoro compiuto sul peso quando il volume occupato dal gas aumenta di  $dV$  è dato da  $p dV$ . Otteniamo così

$$\begin{aligned} W &= \int_{V_0/2}^{V_0} p dV = \int_{V_0/2}^{V_0} dV \frac{k_B T}{V} \\ &= k_B T \ln \frac{V_0}{V_0/2} = k_B T \ln 2. \end{aligned} \quad (23)$$

Questa è la quantità massima che si può estrarre, perché richiede che l'espansione del gas avvenga il più lentamente possibile. Evidentemente, se la parete mobile viene spostata molto rapidamente dal centro alla fine del cilindro, in modo che la molecola non faccia in tempo ad urtarla, il lavoro estratto sarà nullo.

Notiamo che questo risultato appare in contraddizione con il secondo principio, che, nella formulazione dovuta a Lord Kelvin, stipula "che non è possibile, tramite una trasformazione ciclica, trasformare in lavoro una quantità di calore estratta da un serbatoio a temperatura uniforme". Si può mantenere la validità del secondo principio solo se si stabilisce di contare l'informazione ottenuta sul sistema nel bilancio dell'entropia. In effetti, il risultato dell'identificazione della metà del cilindro in cui si trova la particella deve essere stato registrato su qualche supporto per permettere di definire il protocollo successivo, (Se il peso viene agganciato dalla parte sbagliata, esso verrà abbassato, invece che alzato, nell'espansione del gas.) Quindi la trasformazione che abbiamo considerato non può dirsi ciclica, a meno che non si cancelli l'informazione contenuta nel supporto, riportandolo a uno stato di riferimento. Dobbiamo quindi considerare un sistema globale costituito dal nostro cilindro (S), dal serbatoio (R) e da una memoria (M) a due stati.

Inizialmente il cilindro non è diviso in due e la memoria sta in uno stato di riferimento, per

esempio 0. La parete mobile viene inserita nel cilindro, e la particella si trova con uguale probabilità a sinistra o a destra della parete. Quando viene misurata la posizione della particella, la memoria rimane nello stato 0 se la particella sta a sinistra, o viene posta nello stato 1 se sta a destra. Poi avviene l'espansione, il peso viene innalzato, guadagnando una certa quantità d'energia (inferiore a  $k_B T \ln 2$ ), e alla fine la parete mobile viene rimossa. Adesso bisogna riportare la memoria nello stato 0, indipendentemente dallo stato (0 o 1) in cui si trova. La validità universale del secondo principio richiede che questa operazione implichi la dissipazione (cioè la cessione al serbatoio di calore) di una quantità di energia almeno uguale a  $k_B T \ln 2$ . Altrimenti questa macchina fornirebbe un esempio di moto perpetuo del secondo tipo, permettendo di trasformare in lavoro una quantità illimitata di calore estratta da un unico serbatoio.

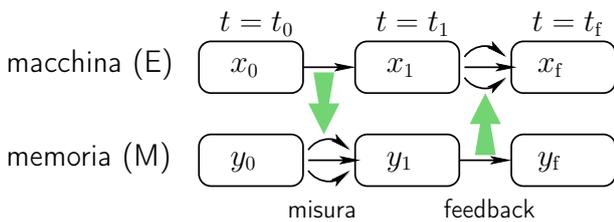
Questa conclusione è nota come il **principio di Landauer**, in onore di R. Landauer, che la enunciò nel 1961 [10]. Un'espressione esplicita del principio è dovuta a C. H. Bennett [11]:

"Ogni manipolazione di informazione logicamente irreversibile, come la cancellazione di un bit o la fusione di due percorsi computazionali, deve essere accompagnata da un corrispondente aumento di entropia nei gradi di libertà dell'apparato o del suo ambiente non associati al contenuto di informazione."

## Relazione di Sagawa-Ueda

Tuttavia questo argomento non è soddisfacente, perché fa discendere il principio di Landauer dal secondo principio della termodinamica. Vorremmo invece poter ricavare questo principio direttamente dai principi della meccanica statistica applicata a sistemi del tipo del diavoleto di Maxwell o della macchina di Szilard. In questo paragrafo cerchiamo, seguendo un argomento dovuto a Hal Tasaki [12], di rendere più precise queste considerazioni trattando dei sistemi costituiti da una macchina E (*engine*) accoppiata a una memoria M. Fisicamente, il motore contiene una parte attiva, analoga al cilindro contenente un singolo atomo considerato da Szilard, in contatto con un

serbatoio di calore alla temperatura  $T$ . Da parte sua, la memoria contiene una parte destinata a registrare le informazioni necessarie a manipolare il motore, in contatto con un altro serbatoio di calore. Il sistema  $E \cup M$  è termicamente isolato, ma può essere manipolato da un agente esterno. Supponiamo che tanto la macchina che la memoria siano sistemi classici, che evolvono in maniera deterministica e in accordo con il teorema di Liouville. L'evoluzione di questi sistemi è determinata istante per istante, secondo le leggi della meccanica, dalle loro hamiltoniane rispettive  $\mathcal{H}^{(E)}(x; \lambda_E)$  e  $\mathcal{H}^{(M)}(y; \lambda_M)$ , che dipendono da una collezione  $\lambda = (\lambda_E, \lambda_M)$  di parametri che possono essere manipolati dall'esterno.



**Figura 10:** Rappresentazione schematica dell'evoluzione temporale del sistema  $E \cup M$ . Dato lo stato iniziale  $(x_0, y_0)$  di  $E \cup M$  al tempo  $t_0$ , in un primo intervallo di tempo E evolve secondo un protocollo assegnato, mentre M evolve secondo un protocollo identificato da  $x_0$ . Questo processo costituisce la **misura**. In un secondo intervallo di tempo, l'evoluzione di E avviene secondo un protocollo dipendente dallo stato  $y_1$  raggiunto da M alla fine del processo di misura, in modo da effettuare il **feedback**, mentre M evolve secondo un protocollo fissato, scelto in modo da cancellare la dipendenza da  $y_1$  dei gradi di libertà che rappresentano l'informazione. Entrambi i protocolli sono scelti in modo da riportare le hamiltoniane di entrambi i sistemi alla loro forma iniziale. Le frecce verdi nel diagramma rappresentano gli effetti rispettivamente della misura e del feedback. Ispirato da [12].

L'evoluzione del sistema può essere suddivisa in diverse fasi (vedi Figura. 10):

1. Al tempo iniziale  $t_0$  la macchina e la memoria si trovano in uno stato iniziale, rispettivamente denotato con  $x_0 \in \mathcal{E}$  e  $y_0 \in \mathcal{M}$ , dove  $\mathcal{E}$  e  $\mathcal{M}$  rappresentano rispettivamente lo spazio delle fasi di E e di M. Si suppone che non ci siano state precedenti interazioni, e quin-

di che  $x_0$  e  $y_0$  siano quantità indipendenti, il che implica che la loro probabilità congiunta si fattorizza. Indicando con  $\rho(x, y; t)$  la probabilità congiunta dello stato  $x$  di E e dello stato  $y$  di M al tempo  $t$ , si ha quindi

$$\rho(x_0, y_0; t_0) = \rho_0^{(E)}(x_0)\rho_0^{(M)}(y_0). \quad (24)$$

2. In un primo intervallo di tempo,  $t_0 \leq t \leq t_1$ , la macchina E evolve seguendo un protocollo  $\lambda_E = (\lambda_E(t))$  fissato: quindi, al tempo  $t_1$ , essa si troverà in uno stato  $x_1$  che dipende esclusivamente dalla condizione iniziale  $x_0$ . Nello stesso intervallo di tempo, M evolve secondo un protocollo  $\lambda_M = (\lambda_M(t))$  determinato dal valore  $x_0$  dello stato iniziale di E. Questo protocollo dipende esplicitamente da  $x_0$ , ma si suppone che il valore  $\lambda_M(t_1)$  che il parametro di manipolazione  $\lambda_M$  assume al tempo finale  $t_1$  sia indipendente da  $x_0$ . In conseguenza della manipolazione, lo stato  $y_1$  di M al tempo  $t_1$  dipende tanto dalla condizione iniziale  $y_0$  di M che dalla condizione iniziale  $x_0$  di E al tempo  $t_0$ . Ci riferiremo al processo che si svolge in questo intervallo di tempo come alla **misura**. Infatti, in conseguenza di questa evoluzione, lo stato iniziale  $x_0$  di E viene rappresentato dallo stato  $y_1$  della memoria M. Questo effetto viene rappresentato dalla freccia verde che passa da E a M in Figura 10.
3. In un secondo intervallo di tempo,  $t_1 \leq t \leq t_f$ , E ed M si scambiano i ruoli. Adesso è la macchina E che evolve secondo un protocollo determinato dallo stato  $y_1$  della memoria al tempo  $t_1$ : questa dipendenza rappresenta il **feedback** ed è indicata dalla freccia verde che passa da M ad E nella figura. Si suppone che, indipendentemente dal valore di  $y_1$ , il parametro  $\lambda_E$  assuma al tempo finale  $t_f$  il valore  $\lambda_E(t_0)$  che aveva al tempo iniziale  $t_0$ . Nel frattempo, la memoria M evolve secondo un protocollo  $\lambda_M = (\lambda_M(t))$  fissato, e scelto in modo da cancellare gli effetti dell'interazione con E. Questa ipotesi richiede che sia possibile distinguere, entro M, i gradi di libertà che portano informazione (cioè relativi alla memoria propriamente detta) dai gradi di libertà del rispettivo serbatoio

io di calore, che non sono accessibili per il feedback. Anche questo protocollo è scelto in modo tale che il valore di  $\lambda_M(t_f)$  al tempo finale sia uguale al suo valore  $\lambda_M(t_0)$  al tempo iniziale.

Dato che, una volta fissato  $x_0$ , le hamiltoniane di E e di M evolvono secondo un protocollo fissato, per il teorema di Liouville ognuna delle trasformazioni  $x_0 \rightarrow x_1$  e  $y_0 \rightarrow y_1$  (con  $x_0$  fissato) conserva il volume rispettivamente entro  $\mathcal{E}$  ed entro  $\mathcal{M}$ . Allo stesso modo, le trasformazioni  $y_1 \rightarrow x_f$  (con  $y_1$  fissato) e  $y_1 \rightarrow y_f$  conservano i rispettivi volumi. Inoltre la trasformazione dallo stato iniziale  $(x_0, y_0)$  a quello intermedio  $(x_1, y_1)$  è univoca e invertibile. Infatti, dato lo stato intermedio  $(x_1, y_1)$ , notiamo che l'evoluzione  $x_0 \rightarrow x_1$  è invertibile ed indipendente da  $y_1$ : quindi, dato  $x_1, x_0$  è univocamente determinato, e quindi anche la trasformazione  $y_0 \rightarrow y_1$  è determinata. Ma se  $x_0$  è fissato, essa è anche invertibile. Un simile ragionamento mostra che la trasformazione che porta da  $(x_1, y_1)$  a  $(x_f, y_f)$  è anch'essa univoca e invertibile. Concludendo, la trasformazione che porta dallo stato iniziale  $(x_0, y_0)$  allo stato finale  $(x_f, y_f)$  è univoca, invertibile, e conserva i volumi dello spazio delle fasi dei sistemi E ed M.

Per un sistema di questo tipo, e dato lo stato finale  $(x_f, y_f)$  di  $E \cup M$  espresso in funzione dello stato iniziale  $(x, y)$ , possiamo definire il lavoro compiuto rispettivamente su E e su M come segue:

$$W^{(E)}(x, y) = \mathcal{H}^{(E)}(x_f) - \mathcal{H}^{(E)}(x); \quad (25)$$

$$W^{(M)}(x, y) = \mathcal{H}^{(M)}(y_f) - \mathcal{H}^{(M)}(y). \quad (26)$$

In altre parole,  $W^{(E)}(x, y)$  è la differenza fra l'energia di E alla fine e all'inizio della manipolazione, supponendo che lo stato iniziale di  $E \cup M$  sia dato da  $(x, y)$ , ed analogamente  $W^{(M)}(x, y)$  è la corrispondente differenza per M. Ricordando che tanto E che M sono termicamente isolati (e comprendono ciascuno un proprio serbatoio di calore), la variazione della loro energia è pari al lavoro compiuto su ciascuno di essi. D'altra parte, la manipolazione è definita in modo che la hamiltoniana del sistema alla fine di essa è uguale alla hamiltoniana iniziale. Possiamo quindi applicare al sistema  $E \cup M$  la relazione di

Jarzynski (18), ottenendo

$$\begin{aligned} \langle e^{-W/k_B T} \rangle &= \\ \int dx dy e^{-(W^{(E)}(x, y) + W^{(M)}(x, y))/k_B T} \rho(x, y; t_0) & \\ = e^{-\Delta F/k_B T} = 1, & \end{aligned} \quad (27)$$

dove abbiamo definito il lavoro totale  $W$  compiuto sul sistema  $E \cup M$  come

$$W(x, y) = W^{(E)}(x, y) + W^{(M)}(x, y), \quad (28)$$

e abbiamo tenuto conto del fatto che  $\Delta F = 0$  se la hamiltoniana alla fine della manipolazione è pari a quella di partenza.

Vogliamo però generalizzare questa relazione considerando lo scambio di informazioni fra E ed M. A questo scopo, consideriamo la probabilità condizionata dello stato  $y_1$  di M alla fine della misura, dato lo stato  $x$  di E all'inizio della misura stessa:

$$\rho^{(M)}(y_1|x) = \int dy \delta(y_1 - y_1(x, y)) \rho_0^{(M)}(y), \quad (29)$$

dove denotiamo con  $y_1(x, y)$  il valore di  $y$  al tempo intermedio  $t_1$  che si ottiene quando lo stato iniziale del sistema è uguale a  $(x, y)$ . Possiamo allora valutare l'informazione scambiata nella misura fra E ed M, dati  $x$  e lo stato intermedio  $y_1$  di M, nella maniera seguente. Definiamo

$$\mathcal{I}(x, y_1) = \ln \frac{\rho^{(M)}(y_1|x)}{\rho^{(M)}(y_1)}, \quad (30)$$

dove  $\rho^{(M)}(y_1)$  è la distribuzione marginale dello stato intermedio  $y_1$  di M:

$$\rho^{(M)}(y_1) = \int dx \rho^{(M)}(y_1|x) \rho_0^{(M)}(x). \quad (31)$$

Allora la quantità di informazione totale scambiata fra E ed M nel processo di misura è data dalla media di  $\mathcal{I}(x, y_1)$ :

$$\begin{aligned} I(x : y_1) &= \langle \mathcal{I}(x, y_1) \rangle \\ &= \int dx dy_1 \rho^{(M)}(y_1|x) \rho_0^{(E)}(x) \mathcal{I}(x, y_1) \end{aligned} \quad (32)$$

Questa quantità è non-negativa, come mostrato in appendice. Allora si può mostrare (la dimostrazione è riportata in appendice) che valgono

le seguenti relazioni

$$\left\langle e^{-\left(W^{(E)}(x,y)/k_B T + \mathcal{I}(x,y_1)\right)} \right\rangle = 1; \quad (33)$$

$$\left\langle e^{-\left(W^{(M)}(x,y)/k_B T - \mathcal{I}(x,y_1)\right)} \right\rangle = 1. \quad (34)$$

Per la relazione di Jensen, l'equazione (33) implica

$$\left\langle W^{(E)}(x,y) \right\rangle \geq -k_B T I(x : y_1). \quad (35)$$

La relazione (33) è nota come **relazione di Sagawa-Ueda** [13] e costituisce la generalizzazione della relazione di Jarzynski che cercavamo. L'equazione (35) che ne consegue mostra che, come suggerito da Szilard, la macchina E può compiere lavoro sull'esterno (cioè il lavoro  $W^{(E)}$  compiuto su di essa può essere negativo) purché l'informazione scambiata fra essa e la memoria M non sia nulla. Tuttavia, applicando la relazione di Jensen alla (27) otteniamo che il lavoro totale compiuto sul sistema EUM non può essere negativo: in altri termini, che il lavoro estratto da E mediante il feedback viene più che compensato dal lavoro necessario per cancellare le informazioni contenute nella memoria. Questo è confermato dal risultato dell'applicazione della relazione di Jensen alla (34):

$$\left\langle W^{(M)}(x,y) \right\rangle \geq k_B T I(x : y_1). \quad (36)$$

Abbiamo così ottenuto una conferma del principio di Landauer nell'ambito di un approccio di meccanica statistica in un sistema descritto dalla meccanica hamiltoniana classica.

## Conclusioni

Sviluppi più recenti hanno messo in luce la dissipazione d'energia intrinsecamente collegata al controllo della regolarità dei motori molecolari, fornendo delle predizioni che hanno potuto essere confrontate con successo con l'esperienza. Questo tipo di relazioni è noto sotto il nome di **relazioni d'incertezza termodinamiche**. Analoghe relazioni sono state ottenute per la precisione della copia o della traduzione dell'informazione contenuta nei polimeri biologici, come il DNA o le proteine, e più in generale per identificare il costo energetico della manipolazione dell'infor-

mazione. Questo ha grande importanza in una situazione in cui una gran parte dell'energia viene dissipata in questa manipolazione (secondo alcune stime, quasi il 0.6% del consumo totale annuo di energia viene speso per la sola validazione via *blockchain* delle criptovalute). Purtroppo non ho abbastanza spazio qui per discutere di questi sviluppi, ma mi auguro di poterlo fare in un ulteriore contributo.

Spero di avere mostrato come la termodinamica stocastica abbia permesso di chiarire alcuni punti oscuri nelle fondazioni della meccanica statistica e di riconciliare la stocasticità osservata nei piccoli sistemi con il comportamento deterministico previsto dalla termodinamica dei sistemi macroscopici.

## Appendici

### A. Idee fondamentali della meccanica statistica

Nella meccanica statistica consideriamo un sistema costituito da un grandissimo numero di particelle. Supponiamo per il momento di poter descrivere la sua evoluzione mediante la meccanica classica. Allora, se il sistema è isolato (cioè se non ci sono forze esterne che agiscono su di esso), la conoscenza del suo microstato (cioè dei valori delle posizioni e delle velocità di ciascuna particella) ad un istante  $t_0$  determina univocamente la sua evoluzione a tempi successivi. Il microstato del sistema è noto quando siano date la posizione  $\mathbf{r}_\alpha$  e la velocità  $\mathbf{v}_\alpha$  di ciascuna particella  $\alpha$  (supposta puntiforme, cioè di dimensioni trascurabili rispetto alle distanze tra le particelle e priva di struttura interna). Si preferisce però descrivere il microstato di un tale sistema assegnando le posizioni  $\mathbf{r}_\alpha$  e le quantità di moto (o momenti)  $\mathbf{p}_\alpha = m_\alpha d\mathbf{r}_\alpha/dt$  delle particelle ( $\alpha = 1, \dots, N$ ) piuttosto che le posizioni e velocità. Lo spazio dei microstati così definito è detto **spazio delle fasi**. In questa rappresentazione, le equazioni del moto del sistema assumono una forma particolarmente semplice, e per esplicitarle è sufficiente la conoscenza dell'espressione dell'energia del sistema in funzione del microstato: questa funzione è detta **hamiltoniana**. Se indichiamo con  $\xi = (\mathbf{r}_1, \mathbf{p}_1, \dots, \mathbf{r}_N, \mathbf{p}_N)$  il microstato di un sistema di  $N$  particelle puntiformi, ciascuna di massa

$m_\alpha$  ( $\alpha = 1, \dots, N$ ), e interagenti fra loro tramite un potenziale  $U(\mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_N; t)$  (possibilmente dipendente dal tempo  $t$ ), l'hamiltoniana è data da

$$\mathcal{H}(\xi; t) = \sum_{\alpha=1}^N \frac{p_\alpha^2}{2m_\alpha} + U(\mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_N; t). \quad (37)$$

Allora le equazioni del moto che permettono di seguire l'evoluzione del sistema sono date da

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{r}_\alpha}{dt} &= \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial \mathbf{p}_\alpha}; \\ \frac{d\mathbf{p}_\alpha}{dt} &= -\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial \mathbf{r}_\alpha}. \end{aligned} \quad (38)$$

Questa espressione delle equazioni del moto vale anche per espressioni dell'hamiltoniana diverse dalla (37), purché sia espressa in funzione delle coordinate  $\mathbf{r}_\alpha$  e dei corrispondenti momenti coniugati  $\mathbf{p}_\alpha$ .

L'evoluzione del sistema viene descritta nello spazio delle fasi, in cui lo stato del sistema è identificato dalle posizioni  $\mathbf{r}_\alpha$  e quantità di moto  $\mathbf{p}_\alpha$  di ciascuna particella  $\alpha$ , perché in esso vale il **teorema di Liouville**. Consideriamo all'istante  $t_0$  una regione  $\Gamma_0$  dello spazio delle fasi, e indichiamo con  $|\Gamma_0|$  il suo volume:

$$|\Gamma_0| = \int_{\Gamma_0} \prod_{\alpha=1}^N d\mathbf{r}_\alpha d\mathbf{p}_\alpha, \quad (39)$$

dove l'integrale è esteso a tutta la regione  $\Gamma_0$ . Indichiamo con

$$\xi_0 = ((\mathbf{r}_1^{(0)}, \mathbf{p}_1^{(0)}), \dots, (\mathbf{r}_N^{(0)}, \mathbf{p}_N^{(0)})), \quad (40)$$

un generico microstato appartenente a  $\Gamma_0$ . Se il sistema si trova in  $\xi_0$  all'istante  $t = t_0$ , si troverà all'istante  $t$  in un determinato microstato  $\xi(t; \xi_0)$ . Al variare di  $\xi_0$  in  $\Gamma_0$ , questo stato evoluto percorrerà una regione  $\Gamma_t$ , che è l'immagine evoluta di  $\Gamma_0$ . Il teorema di Liouville dice che il volume  $|\Gamma_t|$  della regione evoluta è uguale al volume  $|\Gamma_0|$  della regione iniziale. È importante sottolineare che il teorema di Liouville vale anche quando la dinamica del sistema, descritta dalla sua hamiltoniana  $\mathcal{H}(\xi; t)$ , dipende esplicitamente dal tempo. Inoltre, una forma del teorema di Liouville vale anche per sistemi quantistici. Nel seguito considereremo esplicitamente solo sistemi

classici.

Il legame tra la meccanica e la termodinamica è espresso dal **postulato di Boltzmann**, che impone una relazione fra l'entropia termodinamica  $S$  di un sistema in uno stato di equilibrio termodinamico e il volume  $|\Gamma|$  della regione accessibile dello spazio delle fasi corrispondente a quello stato:

$$S = k_B \ln |\Gamma|. \quad (41)$$

In questa equazione,  $k_B$  è la costante di Boltzmann, che vale approssimativamente  $1.38 \times 10^{-23}$  J/K. Per interpretare questa relazione, notiamo che uno stato termodinamico di equilibrio di un sistema è identificato dai valori di un numero finito e piccolo di funzioni di stato  $(X_0(\xi), X_1(\xi), \dots, X_r(\xi))$ , dove, per esempio,  $X_0(\xi)$  è l'energia interna,  $X_1(\xi)$  il volume,  $X_f(\xi)$  il numero di particelle, e così via. Allora la regione accessibile  $\Gamma(X_0, X_1, \dots, X_r)$  è la regione dello spazio delle fasi in cui queste funzioni termodinamiche assumono i valori dati, a meno di piccole incertezze. Essa è quindi definita dalle seguenti disuguaglianze:

$$\begin{aligned} X_0 &\leq X_0(\xi) \leq X_0 + \Delta X_0, \dots, \\ X_r &\leq X_r(\xi) \leq X_r + \Delta X_r. \end{aligned} \quad (42)$$

Si può mostrare che il valore preciso delle incertezze  $\Delta X_0, \dots, \Delta X_r$  non ha importanza. Il corrispondente volume è dato da

$$|\Gamma(X_0, X_1, \dots, X_r)| = \int_{\Gamma(X_0, X_1, \dots, X_r)} d\xi, \quad (43)$$

dove l'integrale è esteso alla regione accessibile  $\Gamma(X_0, X_1, \dots, X_r)$ .

A uno stato di equilibrio termodinamico corrisponde, in generale, una distribuzione di probabilità  $p(\xi)$  nello spazio delle fasi. Questo non è contraddittorio con l'espressione data sopra della regione accessibile dello spazio delle fasi. Infatti, per i sistemi termodinamici macroscopici si può far vedere che la distribuzione di probabilità  $p(\xi)$  è sostanzialmente diversa da zero solo nella regione accessibile. Consideriamo per esempio il caso di un sistema S in contatto con un serbatoio di calore R molto più grande. L'energia  $E = E^{(S)} + E^{(R)}$  del sistema totale  $S \cup R$  è fissata. Quindi la probabilità che il sistema S si trovi in uno stato microscopico  $\xi$  caratterizzato

dal valore  $E^{(S)}(\xi)$  dell'energia è proporzionale al volume  $|\Gamma^{(R)}(E - E^{(S)}(\xi))|$  della regione accessibile dello spazio delle fasi di R, con energia pari a  $E - E^{(S)}(\xi)$ . Per il postulato di Boltzmann, questo volume può essere espresso in termini dell'entropia  $S^{(R)}$  del serbatoio di calore, mediante l'equazione

$$|\Gamma^{(R)}(E - E^{(S)}(\xi))| = e^{S^{(R)} \frac{E - E^{(S)}(\xi)}{k_B}}. \quad (44)$$

D'altra parte, si ha

$$S^{(R)}(E - E^{(S)}(\xi)) \simeq S^{(R)}(E) - \frac{1}{T} E^{(S)}(\xi), \quad (45)$$

dove

$$\frac{1}{T} = \frac{\partial S^{(R)}}{\partial E}, \quad (46)$$

è l'inverso della temperatura assoluta determinata dal serbatoio di calore. Otteniamo così la **distribuzione di Maxwell-Boltzmann**:

$$p^{\text{eq}}(\xi) = \frac{1}{Z} e^{-E^{(S)}(\xi)/k_B T}. \quad (47)$$

Il fattore di normalizzazione  $Z$  è chiamato **funzione di partizione**, ed è dato da

$$Z = \int d\xi e^{-E^{(S)}(\xi)/k_B T}, \quad (48)$$

dove l'integrale è esteso a tutto lo spazio delle fasi di S. Si dimostra facilmente che l'entropia di S è espressa in termini della distribuzione di probabilità  $p^{\text{eq}}(\xi)$  da

$$S = -k_B \int d\xi p^{\text{eq}}(\xi) \ln p^{\text{eq}}(\xi). \quad (49)$$

Questa relazione è nota come **formula di Gibbs**. L'espressione a secondo membro ha naturalmente un valore per distribuzioni  $p(\xi)$  arbitrarie. A parte il fattore  $k_B$ , essa è una misura generale dell'incertezza contenuta in una distribuzione di probabilità  $p(\xi)$  ed è nota come **entropia di Shannon**. Sfruttando questa relazione, si ottiene l'espressione dell'energia libera  $F = E - TS$  in termini della funzione di partizione  $Z$ :

$$F = -k_B T \ln Z. \quad (50)$$

## B. Elementi di teoria dell'informazione

Consideriamo un sistema che può trovarsi in uno degli  $N$  stati,  $x = 1, \dots, N$ , con probabilità  $p_x$ . Qual è l'incertezza che abbiamo sul suo stato? In altre parole, possiamo valutare qual è la quantità di informazione che riceviamo (in media) quando conosciamo il suo stato  $x$  con certezza? Questa quantità è valutata dall'entropia di Shannon  $H_S(p)$ , definita da

$$H_S(p) = -k \sum_{x=1}^N p_x \ln p_x, \quad (51)$$

dove  $k$  è una costante positiva, per altro arbitraria. In questa espressione, si conviene che il contributo di  $p_x \ln p_x$  si annulli quando  $p_x = 0$ . Si può mostrare abbastanza facilmente che questa quantità è l'unica funzione della distribuzione di probabilità  $p = (p_x)$  che soddisfa le seguenti condizioni:

1.  $H_S(p)$  è una funzione continua delle  $p_x$ . Quindi piccole variazioni delle  $p_x$  implicano piccole variazioni di  $H_S(p)$ .
2. Se  $x = 1, \dots, N$  e  $p_x = 1/N$ , allora  $\mathcal{I}(N) = H_S(\frac{1}{N}, \dots, \frac{1}{N})$  è una funzione crescente di  $N$ . In effetti, l'incertezza di una distribuzione uniforme su  $N$  stati aumenta al crescere di  $N$ .
3. La misura dell'incertezza è coerente, nel senso che non varia se la si può misurare in più di una maniera.

Per rendere più chiara l'ultima condizione, supponiamo di raggruppare gli  $N$  stati  $x$  in  $M < N$  gruppi  $W_y$  identificati dalla variabile  $y$ ,  $y = 1, \dots, M$ . Conseguentemente si avrà che la probabilità  $w_y$  che  $y$  abbia un determinato valore è data da

$$w_y = \sum_{x \in W_y} p_x. \quad (52)$$

Inoltre la probabilità condizionata che il sistema si trovi nello stato  $x$ , noto che sia che  $y$  assume un determinato valore, è espressa da

$$p_{x|y} = \begin{cases} p_x/w_y, & \text{se } x \in W_y, \\ 0, & \text{altrimenti.} \end{cases} \quad (53)$$

Si richiede allora che

$$H_S(p) = H_S(w) + \sum_y w_y H_S(p_{x|y}). \quad (54)$$

In particolare, se le  $x$  e le  $y$  sono tutte ugualmente probabili, si ha

$$H_S(p) = \mathcal{I}(N) = \mathcal{I}(M) + \mathcal{I}(N/M), \quad (55)$$

il che suggerisce la relazione  $\mathcal{I}(N) \propto \ln N$ . Queste condizioni identificano  $H_S(p)$  a meno del fattore positivo  $k$ . In teoria dell'informazione si usa porre  $k = 1/\ln 2$ : la corrispondente unità di informazione è detta *bit*, e corrisponde all'incertezza di una variabile binaria in cui le due alternative sono equiprobabili. Se si pone  $k$  uguale alla costante di Boltzmann  $k_B$ , otteniamo l'entropia di Gibbs, che è uguale all'entropia termodinamica per sistemi descritti dalla distribuzione di equilibrio di Maxwell-Boltzmann.

Per confrontare fra loro due distribuzioni di probabilità,  $p$  e  $q$ , della stessa variabile  $x$  si introduce la **divergenza di Kullback-Leibler**  $D_{KL}(p||q)$ , definita da

$$D_{KL}(p||q) = \sum_x p_x \ln \frac{p_x}{q_x}. \quad (56)$$

Tramite la disuguaglianza  $\ln x < x - 1$  si mostra facilmente che  $D_{KL}(p||q) \geq 0$ , e che essa si annulla solo se  $p_x = q_x$ ,  $x = 1, \dots, N$ . Quindi  $D_{KL}(p||q)$  misura in un certo senso la distanza di  $p$  da  $q$ . Tuttavia, a differenza della distanza geometrica, essa non è simmetrica: per esempio, se  $p_x > 0$  per una  $x$  in cui  $q_x$  si annulla, si ha  $D_{KL}(p||q) = \infty$ , mentre  $D_{KL}(q||p)$  può essere finita.

La divergenza di Kullback-Leibler può essere utilizzata per valutare l'informazione condivisa da due variabili aleatorie,  $x$  e  $y$ . Si definisce infatti l'**informazione mutua**  $I(x : y)$  tramite l'espressione

$$I(x : y) = \sum_{x,y} p_{x,y} \ln \frac{p_{x,y}}{p_x p_y}, \quad (57)$$

dove  $p_x = \sum_y p_{x,y}$  è la **distribuzione marginale** di  $x$ , ed analogamente per  $p_y$ . Quindi  $I(x : y)$  è la divergenza di Kullback-Leibler fra la distribuzione congiunta  $p_{x,y}$  e il prodotto delle distribuzioni marginali. Essa è quindi non-negativa, e può an-

che essere espressa in funzione delle probabilità condizionate  $p_{x|y}$  e  $p_{y|x}$  da

$$I(x : y) = \sum_{x,y} p_{x|y} p_y \ln \frac{p_{x|y}}{p_x} = \sum_{x,y} p_{y|x} p_x \ln \frac{p_{y|x}}{p_y}. \quad (58)$$

Essa può essere anche espressa in termini dell'**entropia condizionata**  $H_S(x|y)$  definita da

$$H_S(x|y) = - \sum_{x,y} p_{x,y} \ln p_{x|y}, \quad (59)$$

mediante la

$$I(x : y) = H_S(p_x) - H_S(x|y). \quad (60)$$

Si vede quindi che  $I(x : y)$  esprime la diminuzione dell'incertezza su  $x$  data dall'informazione ottenuta su  $y$ .

## C. Dimostrazione delle relazioni (33) e (34)

Sia  $f(x, y_1)$  una funzione arbitraria dello stato iniziale  $x$  di E e dello stato intermedio  $y_1$  di M. Otteniamo allora

$$\begin{aligned} & \left\langle e^{-W^{(E)}(x,y)/k_B T} f(x, y_1) \right\rangle \\ &= \int dx dy e^{-W^{(E)}(x,y)/k_B T} f(x, y_1(x, y)) \rho(x, y; t_0) \\ &= \int dx dy dy_1 \delta(y_1 - y_1(x, y)) \\ & \quad e^{-W^{(E)}(x,y)/k_B T} f(x, y_1) \rho(x, y; t_0) \\ &= \int dx dy dy_1 \delta(y_1 - y_1(x, y)) \\ & \quad \rho_0^{(M)}(y) e^{-W^{(E)}(x,y)/k_B T} f(x, y_1) \rho_0^{(E)}(x) \\ &= \int dx dy_1 \rho^{(M)}(y_1|x) e^{-W^{(E)}(x,y)/k_B T} \\ & \quad f(x, y_1) \rho_0^{(E)}(x), \end{aligned}$$

dove  $y_1(x, y)$  è il valore dello stato di M al tempo intermedio  $t_1$ , dato lo stato iniziale  $x$  di E e lo stato iniziale  $y$  di M. Adesso abbiamo  $\rho_0^{(E)}(x) = e^{-\mathcal{H}^{(E)}(x)/k_B T} / Z^{(E)}$ , dove  $Z^{(E)} = \int dx e^{-\mathcal{H}^{(E)}(x)/k_B T}$  è la funzione di partizione, dato che si suppone che il sistema sia inizialmente all'equilibrio. D'altra parte, vale la (26).

Sostituendo queste relazioni, otteniamo

$$\begin{aligned} & \left\langle e^{-W^{(E)}(x,y)/k_B T} f(x, y_1) \right\rangle \\ &= \int dx dy_1 \rho^{(M)}(y_1|x) f(x, y_1) \\ & \frac{e^{-\mathcal{H}^{(E)}(x_f(x,y_1))/k_B T}}{Z^{(E)}}, \end{aligned} \quad (61)$$

dove abbiamo indicato con  $x_f(x, y_1)$  il valore di  $x$  all'istante finale  $t_f$ , dati il valore iniziale  $x$  dello stato di E e il valore  $y_1$  dello stato di M al tempo intermedio  $t_1$ . Infatti, una volta che sia dato lo stato iniziale  $x$  di E,  $x_f$  dipende dallo stato iniziale  $y$  di M solo per il tramite di  $y_1$ . Supponiamo adesso che  $f(x, y_1)$  sia pari a

$$e^{-\mathcal{I}(x,y_1)} = \rho^{(M)}(y_1)/\rho^{(M)}(y_1|x)$$

Otteniamo

$$\begin{aligned} & \left\langle e^{-(W^{(E)}(x,y)/k_B T + \mathcal{I}(x,y_1))} \right\rangle \\ &= \int dx dy_1 \rho^{(M)}(y_1) \\ & \frac{e^{-\mathcal{H}^{(E)}(x_f(x,y_1))/k_B T}}{Z^{(E)}}. \end{aligned} \quad (62)$$

Tenendo conto che, ovviamente,

$$\int dy_1 \rho^{(M)}(y_1) = 1,$$

questa espressione si riduce a

$$\begin{aligned} & \int dx \frac{e^{-\mathcal{H}^{(E)}(x_f(x,y_1))/k_B T}}{Z^{(E)}} \\ &= \int dx_f \frac{e^{-\mathcal{H}^{(E)}(x_f)/k_B T}}{Z^{(E)}} = 1, \end{aligned} \quad (63)$$

dove abbiamo sfruttato il teorema di Liouville che implica  $dx_f = dx$ , dove  $x_f = x_f(x, y_1)$ . Abbiamo così ottenuto la (33). Per ottenere la (34), supponiamo che  $g(x, y_1)$  sia una funzione arbitraria dello stato iniziale  $x$  di E e dello stato intermedio  $y_1$  di M. Adesso valutiamo un'analogia media, in cui appare il lavoro  $W^{(M)}$  compiuto sulla memoria piuttosto che quello compiuto sulla macchina. Otteniamo

$$\begin{aligned} & \left\langle e^{-W^{(M)}(x,y)/k_B T} g(x, y_1) \right\rangle \\ &= \int dx dy e^{-W^{(M)}(x,y)} g(x, y_1(x, y)) \rho(x, y; t_0) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= \int dx dy g(x, y_1(x, y)) \\ & \frac{e^{-\mathcal{H}^{(M)}(y_1(x,y))/k_B T}}{Z^{(M)}} \rho_0^{(E)}(x) \\ &= \int dx dy_f g(x, y_1(y_f)) \\ & \rho_0^{(E)}(x) \frac{e^{-\mathcal{H}^{(M)}(y_f)/k_B T}}{Z^{(M)}}, \end{aligned} \quad (64)$$

dove  $y_1(y_f)$  è il valore dello stato di M al tempo intermedio  $t_1$ , che è univocamente determinato dallo stato finale  $y_f$  di M, dato che l'evoluzione di M fra  $t_1$  e  $t_f$  è indipendente dallo stato di E. Per ottenere l'ultima uguaglianza abbiamo sfruttato di nuovo l'espressione (26) del lavoro  $W^{(M)}$  e della distribuzione iniziale, preso come variabile di integrazione  $y_f$  al posto di  $y$  e sfruttato il teorema di Liouville. Supponiamo ora che  $g(x, y_1)$  sia dato da  $e^{\mathcal{I}(x,y_1)}$ . Si ha allora

$$\begin{aligned} & \int dx g(x, y_1) \rho_0^{(E)}(x) \\ &= \int dx \frac{\rho^{(M)}(y_1|x)}{\rho^{(M)}(y_1)} \rho_0^{(E)}(x) = 1. \end{aligned} \quad (65)$$

Allora si vede subito che l'integrale ottenuto è pari a 1, da cui segue la (34).

È da sottolineare che la decomposizione del lavoro totale  $W$  nella forma

$$W^{(E)} + W^{(M)} = (W^{(E)} + U) + (W^{(M)} - U), \quad (66)$$

quando  $U = k_B T I$ , ha la proprietà che tanto la quantità che appare nel primo membro e ciascuno dei termini che appaiono nel secondo membro soddisfano relazioni di fluttuazione analoghe alla relazione di Jarzynski. Si può vedere che questa decomposizione è unica nel modo seguente. Perché l'integrale che appare nella (61) possa trasformarsi nel prodotto di due integrali indipendenti, occorre che la funzione  $f(x, y_1)$  abbia la forma

$$f(x, y_1) = \frac{\nu(y_1)}{\rho^{(M)}(y_1|x)}. \quad (67)$$

Perché l'integrale risultante valga 1, occorre che la funzione  $\nu(y_1)$  che appare in questa equazione

soddisfi la relazione

$$\int dy_1 \nu(y_1) = 1. \quad (68)$$

D'altra parte, la semplificazione dell'integrale che appare nell'equazione (64) ha luogo non appena la funzione  $g(x, y_1)$  soddisfa la relazione  $\int dx g(x, y_1) \rho_0^{(E)}(x) = \text{const.}, \forall y_1$ , con la costante pari a 1 se vogliamo ottenere la relazione di Jarzynski. Ma se vogliamo che valga la decomposizione (66) dobbiamo avere  $g = 1/f$ . Sostituendo la (67) in questa relazione, otteniamo

$$1 = \int dx \frac{\rho^{(M)}(y_1|x)}{\nu(y_1)} \rho_0^{(E)}(x) = \frac{\rho^{(M)}(y_1)}{\nu(y_1)}. \quad (69)$$

Questo determina univocamente  $\nu(y_1)$  e quindi che

$$g(x, y_1) = \frac{1}{f(x, y_1)} = e^{\mathcal{I}(x, y_1)}, \quad (70)$$

confermando l'unicità della decomposizione (66) con  $U = k_B T I$ .



- [1] J. W. Gibbs: *Elementary Principles in Statistical Mechanics: Developed with Especial Reference to the Rational Foundations of Thermodynamics*, C. Scribner's sons, New York (1902).
- [2] A. Einstein: *Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen*, Ann. Physik, 17 (1905) 549.  
Traduzione italiana: A. Einstein: *Il moto delle particelle in sospensione nei fluidi in quiete, come previsto dalla teoria cinetico-molecolare del calore*, in *Opere Scelte*, a cura di E. Bellone. Bollati Boringhieri, Torino (1988) Pagg. 136-147.
- [3] J. Perrin: *Les Atomes*, Alcan, Paris (1912).  
Traduzione italiana: J. Perrin, *Gli atomi*. Editori Riuniti, Roma (2014).
- [4] C. Jarzynski: *Equalities and inequalities: Irreversibility and the second law of thermodynamics at the nanoscale*, Annual Reviews of Condensed Matter Physics, 2 (2011) 329.
- [5] U. Seifert: *Stochastic thermodynamics, fluctuation theorems, and molecular machines*, Reports on Progress in Physics, 75 (2012) 126001.
- [6] L. Peliti, S. Pigolotti: *Stochastic Thermodynamics: An Introduction*, Princeton University Press, Princeton (USA) (2021).
- [7] B. Cleuren, C. Van den Broeck, R. Kawai: *Fluctuation and dissipation of work in a Joule experiment*, Phys. Rev. Lett., 96 (1996) 050601.

- [8] A. Mossa, M. Manosas, N. Forns, J. M. Huguet, F. Ritort: *Dynamic force spectroscopy of DNA hairpins: I. Force kinetics and free energy landscapes*, Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment, (2009) 2009.P02060
- [9] L. Szilard: *Über die Entropieverminderung in einem thermodynamischen System bei Eingriffen intelligenter Wesen*, Zeitschrift für Physik, 53 (1929) 840.
- [10] R. Landauer: *Irreversibility and heat generation in the computing process*, IBM Journal of Research and Development, 3 (1961) 183.
- [11] C. H. Bennett: *The thermodynamics of computation—A review*, International Journal of Theoretical Physics, 21 (1982) 905.
- [12] H. Tasaki: *Unified Jarzynski and Sagawa-Ueda relations for Maxwell's demon*, arXiv:1308.3776v1, (2013) .
- [13] T. Sagawa, M. Ueda: *Generalized Jarzynski equality under nonequilibrium feedback control*, Physical Review Letters, 104 (2010) 090602.



**Luca Peliti:** è stato Professore Ordinario di Meccanica Statistica presso l'Università "Federico II" di Napoli. Si è occupato di meccanica statistica, applicata in particolare a sistemi di interesse biologico, e dell'approccio statistico alla teoria dell'evoluzione. È autore, in particolare, di *Appunti di Meccanica Statistica* (Bollati Boringhieri, 2003) e di *Stochastic Thermodynamics: An Introduction*, in collaborazione con Simone Pigolotti, Princeton University Press (2021). Al momento è vice direttore del Santa Marinella Research Institute.



Numero XXIII Anno 2024

Viaggio nella Scienza

# Ithaca



---

Comunicare la scienza, parte A

---

