

bimestrale,  
dicembre  
2020

ISSN 0036-4681 - ISBN 978-88-220-9446-9 - anno 87°, n. 6 / € 7,50

# Sapere

idee e progressi della scienza

 edizioni  
Dedalo



**INTERVISTA**  
**AD ALFIO QUARTERONI**  
**La matematica del mondo**

**TECNOLOGIA**  
**Intelligenza artificiale:**  
**i nodi etici e giuridici**

**CLIMA**  
**Il destino del carbonio**  
**negli ecosistemi terrestri**

# Abbonati a Sapere!

[abbonamenti@edizionidedalo.it](mailto:abbonamenti@edizionidedalo.it)



[www.saperescienza.it](http://www.saperescienza.it)

Seguici anche su



WWW.SAPERESCENZA.IT

DIRETTORE  
Nicola Armaroli

EDITORIAL BOARD  
Tommaso Castellani, Elena Ioli, Massimo Trotta

COMITATO SCIENTIFICO  
Vincenzo Barone, Giulio Biroli, Enrico Bonatti,  
Claudio Franceschi, Maria Cristina Facchini,  
Marco Garavelli, Alba L'Astorina, Barbara Moggetti,  
Massimo Monteleone, Roberto Natalini, Alina Polonia,  
Stefano Sandrelli, Sara Tortorella, Adriana Valente

REDAZIONE  
Micaela Ranieri - sapere@edizionidedalo.it

RUBRICHE  
Philip Ball, Federico Benuzzi, Enrico Bonatti,  
Tommaso Castellani, Marco Cervino,  
Antonella Del Rosso, Monica Marelli, Cristina Mangia,  
Roberto Natalini, Vincenzo Palermo, Ennio Peres,  
Alina Polonia, Stefano Sandrelli,  
Marco Signore, Hervé This, Massimo Trotta

TRADUZIONI  
David Santoro (per Philip Ball)  
Andrea Migliori (per Hervé This)

PROGETTO GRAFICO  
Coordinamento: Rosanna Pucciarelli  
Grafica: Salvatore Modugno  
Impaginazione: Stefano Fontana

DIRETTORE RESPONSABILE  
Claudia Coga

DIREZIONE, AMMINISTRAZIONE, ABBONAMENTI  
Edizioni Dedalo  
divisione della Dedalo litostampa srl  
V.le Luigi Jacobini 5, Bari 70132  
Tel. 080/531.14.13 - Fax 080/531.14.14  
e-mail: abbonamenti@edizionidedalo.it  
www.edizionidedalo.it

ABBONAMENTO 2021  
cartaceo più pdf euro 44,00 (estero euro 85,00)  
versione pdf euro 25,00  
A tutti gli abbonati verrà inviato a fine anno,  
in omaggio, il raccoglitore dei fascicoli dell'annata

CONTO CORRENTE POSTALE  
n. 11639705 intestato a: Dedalo litostampa srl, Bari

ARRETRATI  
per i fascicoli arretrati consultare il sito internet  
www.edizionidedalo.it o contattare l'Editore

COPYRIGHT  
edizioni Dedalo  
divisione della Dedalo litostampa srl - Bari  
Manoscritti e fotografie non richiesti non si restituiscono

PUBBLICITÀ  
edizioni Dedalo  
divisione della Dedalo litostampa srl  
V.le Luigi Jacobini 5, Bari 70132  
Tel. 080/531.14.13 - Fax 080/531.14.14  
info@edizionidedalo.it

STAMPA  
Dedalo litostampa srl, Bari

REGISTRAZIONE  
n. 372 del 3 ottobre 1969 del Tribunale di Bari

DISTRIBUZIONE IN LIBRERIA  
Messaggerie libri

foto di copertina  
© Mark Olsen

Ogni tentativo è stato fatto per recuperare i crediti fotografici  
corretti. Ci scusiamo se, per cause indipendenti dalla nostra  
volontà, avessimo ommesso o citato erroneamente alcune fonti.



ASSOCIATO ALL'USPI  
UNIONE STAMPA  
PERIODICI ITALIANA

# IN QUESTO NUMERO



## La matematica del mondo

intervista di Tommaso Castellani  
ad Alfio Quarteroni

## Il destino del carbonio negli ecosistemi terrestri

di Andrea Scartazza  
e Olga Gavrichkova



## Intelligenza artificiale: i nodi etici e giuridici

di Arianna Neri

## Il bioristor e il futuro dell'agricoltura

di Filippo Vurro  
e Michela Janni



## Cento anni di polimerizzazioni: la rivoluzione di Hermann Staudinger

di Eleonora Polo

**EDITORIALE****Polizza Ocea no**

di Nicola Armaroli

**SATELLITE**

news a cura di Luigi Minervini

**ARTICOLI****MATEMATICA APPLICATA****La matematica del mondo**

intervista di Tommaso Castellani ad Alfio Quarteroni

**CLIMA****Il destino del carbonio negli ecosistemi terrestri**

di Andrea Scartazza e Olga Gavrichkova

**TECNOLOGIA****Intelligenza artificiale: i nodi etici e giuridici**

di Arianna Neri

**AGRICOLTURA SMART****Dar voce alle piante: il bioristor e il futuro dell'agricoltura**

di Filippo Vurro e Michela Janni

**STORIA DELLA SCIENZA****Cento anni di polimerizzazioni: la rivoluzione di Hermann Staudinger**

di Eleonora Polo

**STORIE DI SCIENZA****L'invenzione di Google: come due nerd hanno cambiato il mondo**

di Vincenzo Palermo

**STORIE DI...****Darwin a Manhattan**

di Enrico Bonatti

**RUBRICHE****FISICA? UN GIOCO****L'approccio migliore**

di Federico Benuzzi

**LA FORMULA****La matematica dei frattali**

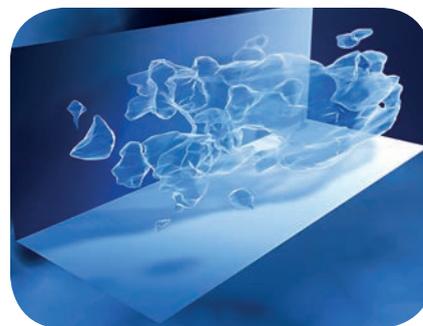
di Tommaso Castellani

**PROTEINE OPERAIE****Take a walk on the wild side**

di Massimo Trotta

5

6



10

16

22

28

32

38

40

42

43

44



**HOMO MATHEMATICUS****Eventi virali**

di Roberto Natalini

**SPAZIO ALLA SCUOLA****Il mondo nuovo di Gianni Rodari**

di Stefano Sandrelli

**TERRA, TERRA!****L'estinzione svelata dalle Dolomiti**

di Alina Polonia

**COSCIENZIAT@****Quale giustizia**

di Marco Cervino e Cristina Mangia

**INNOVAZIONE 4.0****Un FLASH di elettroni contro il cancro**

di Antonella Del Rosso

**L'ISTINTO MUSICALE****La leggenda degli Stradivari**

di Philip Ball

**MOLECOLE IN CUCINA****Il nuovo Concorso di cucina nota a nota**

di Hervé This

**NUMERI IN GIOCO****Lo spirito-guida**

di Ennio Peres

45

46

47

48

49

50

51

52

**SCIENZA LIGHT****LIBRI**

54

**IL RACCONTO****Biglietto di sola andata**

di Giuseppe Mussardo

58

**BUFALE E MISTERI****Il gatto di Nazca**

di Monica Marelli

60

**SCIENZA DA TAVOLO****Le meraviglie degli abissi sul proprio tavolo**

di Marco Signore

61

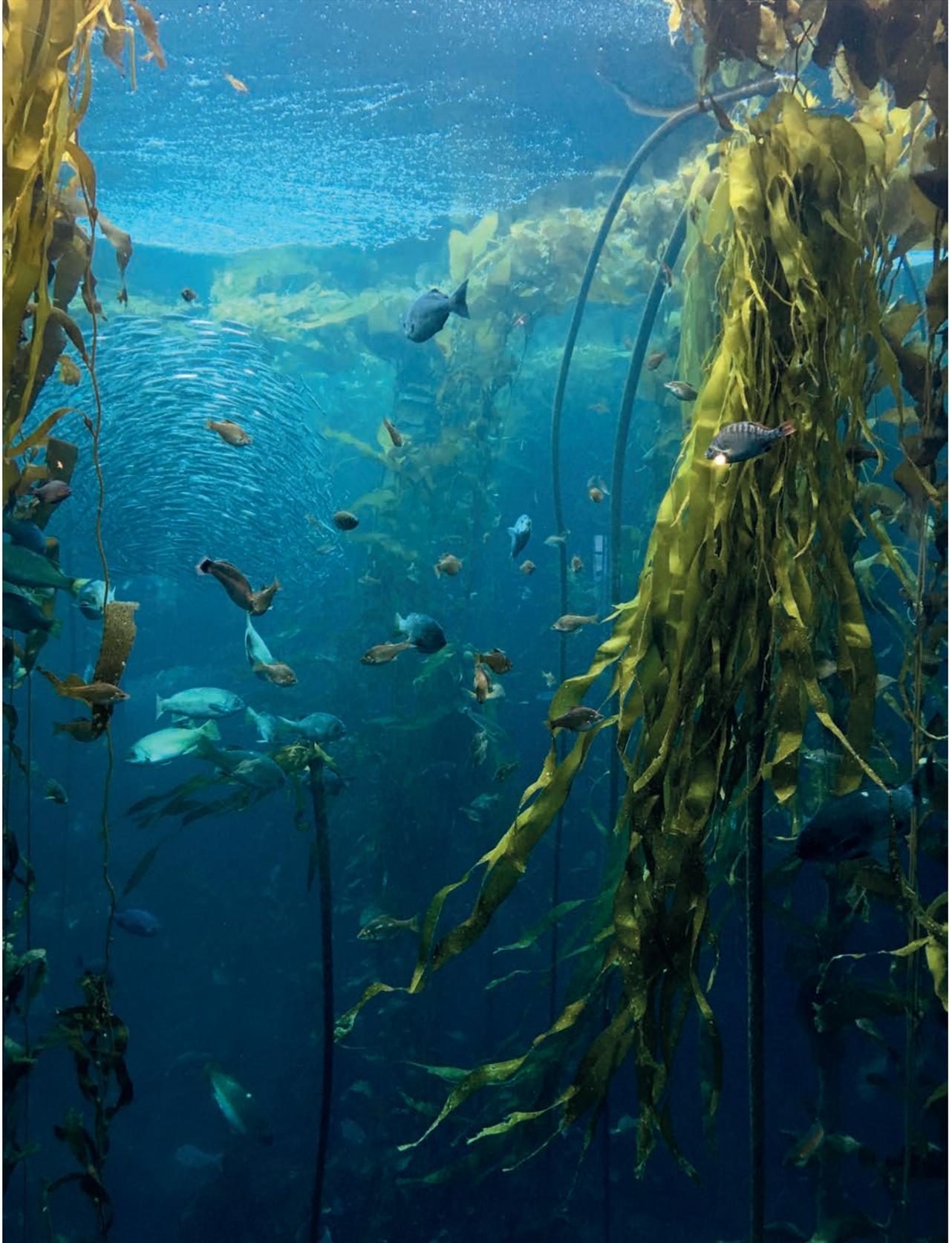
**GRAPHIC NOVEL****Sogno o son desto?**

di Rosemary Natalino

62

**LA MAPPA****Lo sviluppo dei vaccini nel mondo**

64



Mondo di sotto



## Polizza Oceano

Nicola Armaroli

Per molti di noi il mare è solo una sterminata distesa d'acqua utile a scolpire nella mente ricordi memorabili di relax e vacanze. Il mondo che giace là sotto ci è per lo più ignoto. Io, ad esempio, ho scoperto da poco che esistono le *foreste di kelp*, enormi alghe che creano ecosistemi unici, caratterizzati da una biodiversità esplosiva. Nel dicembre 2015 subacquei e ricercatori si godevano e studiavano, come sempre, l'immensa foresta di kelp della Tasmania. Nel corso dell'estate australe, un'ondata di calore senza precedenti disintegrò quella meraviglia della natura: a marzo 2016 un lugubre fondale, piatto e senza vita, aveva preso il posto della foresta sottomarina. Fu l'ennesimo messaggio: il riscaldamento globale è già oggi una minaccia mortale.

Per quattro persone su dieci il mare è la fonte primaria di cibo. L'ecosistema marino produce il 70% dell'ossigeno atmosferico. Gli oceani hanno assorbito oltre il 90% del calore generato dall'effetto serra antropogenico; senza questo effetto stabilizzante, le terre emerse sarebbero già in buona parte desertificate. Le correnti marine sono un fattore chiave nel sistema di controllo del clima terrestre, come la Corrente del Golfo ci insegna, ma lo scioglimento dei ghiacci polari rischia di sconvolgere questo sistema di termoregolazione. Mari e oceani hanno anche un'enorme rilevanza economica: sono la voce principale nell'industria mondiale del turismo, che vale 2500 miliardi di euro, mentre il 90% del commercio globale viaggia su autostrade marine. Sono anche una risorsa potenziale colossale: la produzione eolica *offshore* potrebbe soddisfare una frazione importante della domanda elettrica; nei fondali marini sono poi annidate enormi riserve minerali che in futuro potrebbero soddisfare la crescente domanda di metalli necessari per la transizione energetica: nichel, cobalto, manganese. Questa interes-

te prospettiva pone però diversi interrogativi tecnici ed etici.

Mari e oceani sono letteralmente l'assicurazione sulla vita del genere umano, eppure la cosa pare non essere in cima ai nostri pensieri, visto che il loro maltrattamento prosegue senza sosta. Ogni anno versiamo in mare milioni di tonnellate di rifiuti: oggi sono otto milioni, ma crescono continuamente. Le aree costiere in prossimità della foce dei grandi fiumi sono spesso devastate dai processi di eutrofizzazione innescati dal deflusso di abnormi quantità di fertilizzanti. La capacità rigenerativa delle specie ittiche non è più in grado di reggere la pesca intensiva: il 30% dei mari si sta letteralmente svuotando e, verso la metà del secolo, gli oceani conterranno più plastica che pesci.

Attualmente il 7% delle acque mondiali è area protetta, tuttavia le regole sono flessibili e solo il 2,5% è completamente preservato da ogni tipo di sfruttamento e abuso. Molti interessi si oppongono alla costituzione di santuari marini: le industrie degli idrocarburi e della pesca sono particolarmente attive. Quest'ultima, poi, spicca per la sua scarsa lungimiranza: è scientificamente dimostrato che nelle zone ai confini con le aree protette la pesca è abbondante e sostenibile nel tempo. Non occorre un genio a intuire perché.

Il governo globale dei mari è un problema davvero intricato: sono in gioco grandi interessi di singoli Stati e la gestione di un'immensa vastità di acque internazionali, di tutti e di nessuno. Eppure i mari hanno dimostrato che, proprio come può essere repentina la catastrofe, altrettanto veloce può essere la guarigione. Si stima che sia necessario proteggere almeno il 35% dei mari e degli oceani per mantenerli così in salute da garantire la nostra sopravvivenza nel lungo termine. Siamo lontanissimi dal traguardo.

Negoziati internazionali sono in fase di avvio. Teniamoli d'occhio, se ci sta a cuore il futuro.

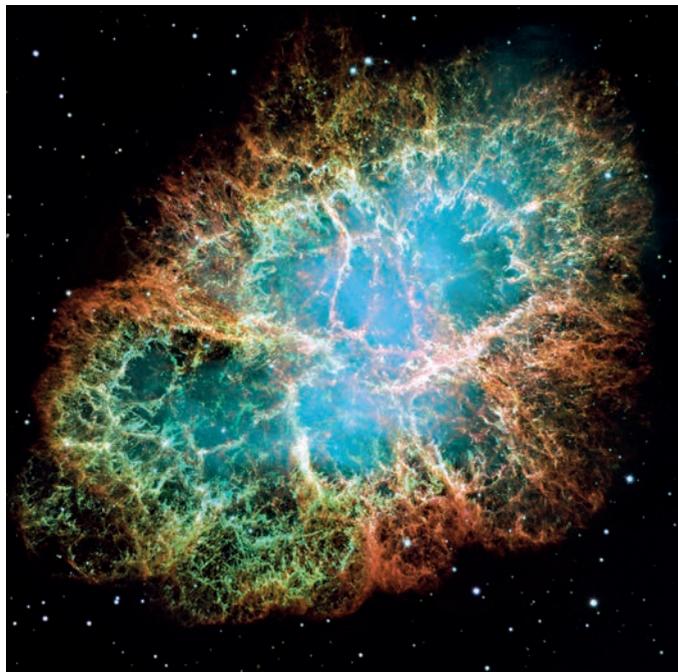
## Supernove ed estinzioni di massa

Il destino degli esseri viventi dipende dalle stelle: da oggi, non è più solo l'astrologia a dirlo. Un gruppo di ricerca guidato da Brian D. Fields, astrofisico dell'Università dell'Illinois, ha infatti ipotizzato che a causare una delle estinzioni avvenute alla fine del Devoniano – 360 milioni di anni fa – sarebbero stati i raggi cosmici arrivati sulla Terra, prodotti dall'esplosione di una supernova (o forse più d'una) distante circa 65 anni-luce da noi. Lo studio è stato pubblicato su *Proceedings of the National Academy of Sciences* (PNAS).

Il Tardo Devoniano è stato un periodo caratterizzato da una lunga riduzione della biodiversità e culminato in una serie di drammatiche estinzioni di massa al passaggio con il Carbonifero. Studi recenti hanno messo in evidenza che l'ultima di queste estinzioni, il cosiddetto "evento Hangenberg", coinciderebbe temporalmente con una drastica riduzione dell'ozono presente nella stratosfera, come testimoniato da numerose spore vegetali fossili bruciate a causa dell'esposizione a raggi ultravioletti. La scomparsa dell'ozono finora è stata attribuita a un aumento delle temperature, ma Fields e colleghi, con la loro ipotesi della supernova, hanno aperto uno scenario ben diverso che, secondo loro, sarebbe più adatto alla situazione considerata.

Infatti, come è spiegato nella pubblicazione, lo strato di ozono potrebbe sì essere intaccato anche da un riscaldamento globale, ma gli effetti sarebbero stagionali, di breve durata e si risentirebbero fino ad altitudini inferiori ai 18 km, laddove le maggiori concentrazioni di ozono sono invece comprese tra i 20 e i 30 km. L'esplosione di una supernova situata alla distanza ipotizzata dal team, invece, inonderrebbe la Terra di radiazioni UV, raggi X e gamma, e i suoi effetti non si fermerebbero qui: i detriti della supernova raggiungerebbero il Sistema Solare, esponendo la nostra atmosfera a un'irradiazione di raggi cosmici per circa 100.000 anni.

La durata del declino della biodiversità desunto dai fossili sarebbe però di 300.000 anni,



© NASA/ESA

suggerendo la possibilità di esplosioni multiple. «Questo è del tutto possibile», ha commentato Jesse Miller, coautore dello studio, «le stelle massicce generalmente si ritrovano in gruppi, e dopo la prima esplosione possono seguirne altre».

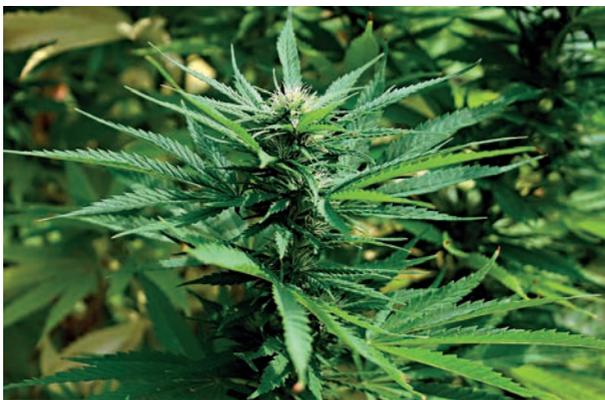
Il passo successivo proposto dal gruppo di ricerca sarà trovare la prova schiacciante che possa confermare questa ipotesi, cercando degli isotopi radioattivi del plutonio-244 e del samario-146 nei campioni di roccia. «Nessuno di questi isotopi si ritrova naturalmente sulla Terra oggi, e l'unico modo per arrivarci è attraverso esplosioni cosmiche» ha spiegato Zhenghai Liu, tra le firme della ricerca. Trovarli sarebbe quindi fondamentale.

Dovremo aspettare per avere certezze, ma lo studio porta con sé una morale già completa: «La vita sulla Terra non esiste isolata», dice Fields, «il cosmo interviene nelle nostre vite, spesso in maniera impercettibile, ma a volte in modo feroce».



## Cannabinoidi contro il cancro al colon

Una nuova ricerca ha mostrato come il THC, una nota sostanza cannabinoide, possa aiutare nella prevenzione del cancro al colon. Lo studio, pubblicato su *iScience*, è stato condotto da un team guidato da William Becker dell'Università del



South Carolina. I risultati hanno evidenziato che gli effetti terapeutici sarebbero dovuti al gruppo di recettori CB2, che non provoca effetti psicoattivi.

La ricerca si è incentrata sul trattamento delle infiammazioni al colon. Questo perché negli ultimi anni si sta verificando un aumento sia delle patologie provocate da queste infiammazioni che dello sviluppo di cancro al colon e rettale, sebbene le cause restino poco chiare. Comprendere le dinamiche di queste patologie e dei tumori associati può dunque essere cruciale. «Siamo stati in grado di dimostrare che il trattamento con THC previene l'infiammazione del colon e allo stesso tempo inibisce lo sviluppo del cancro al colon. Questo supporta l'idea che l'infiammazione e il cancro siano strettamente collegati. Pertanto, nei pazienti che hanno un rischio maggiore di sviluppare il cancro al colon, il THC o altri agenti antinfiammatori possono essere benefici», spiega Prakash Nagarkatti, ricercatore all'Università del South Carolina e coautore dello studio, da anni impegnato nel comprendere gli effetti antinfiammatori delle piante, tra cui la cannabis.



## Le formiche e l'utilità di smettere di volare

La strada per il successo è costellata di piccole rinunce. Nel caso delle formiche, che oggi rappresentano il gruppo di animali più abbondanti sul pianeta, il prezzo per questo traguardo potrebbe essere stato l'aver perso le ali. È quanto afferma un team internazionale di ricercatori guidato da Christian Peeters dell'Università Sorbona di Parigi, che ha condotto uno studio pubblicato su *Frontiers in Zoology*.

Il team, attraverso analisi 3D e ai raggi X di due differenti specie – *Euponera sikorae* e *Cataglyphis savignyi* – ha messo minuziosamente a confronto il torace delle formiche operaie, prive di ali, con quello delle regine, alate come i progenitori da cui discendono. Questo ha permesso di evidenziare che il torace delle operaie, non dovendo più sostenere i muscoli delle ali, si è evoluto in una struttura rigida che conferisce loro la ben nota ca-



pacità di sollevare pesi enormi – ovviamente in proporzione – e che in generale le rende adatte a svolgere il lavoro a terra di foraggiamento.

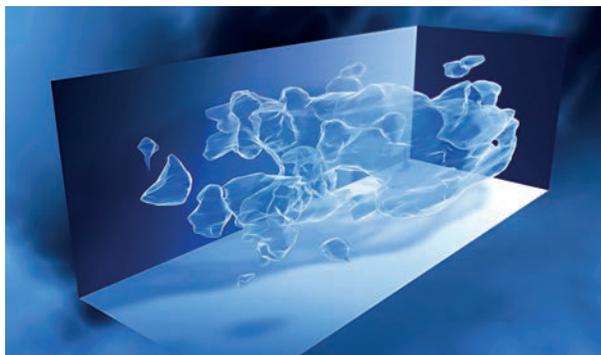
La divisione del lavoro all'interno delle colonie sarebbe proprio alla base del successo ecologico raggiunto da questi insetti, eppure oggi si sa ancora poco dell'evoluzione corporea ad essa connessa. Come gli stessi autori dello studio sottolineano, «un approfondimento sulle innovazioni morfologiche caratteristiche degli insetti sociali potrebbe migliorare la nostra comprensione dell'evoluzione dei comportamenti sociali», tema che riguarda anche la specie umana.



## L'imprevista distribuzione della materia oscura

La materia oscura sta diventando ancora più oscura. Uno studio condotto da un team internazionale e pubblicato recentemente su *Science* ha messo in evidenza una discrepanza tra i dati sperimentali e le simulazioni teoriche che descrivono come la materia oscura dovrebbe essere distribuita negli ammassi di galassie.

La materia oscura costituisce la maggior parte della materia dell'Universo, ed è osservabile solo attraverso il fenomeno della *lente gravitazionale*: una massa molto grande, come quella di un ammasso di galassie, deflette la luce proveniente dagli oggetti situati alle sue spalle, facendoli apparire distorti o replicati. L'entità della deflessione può essere modificata da concentrazioni locali di massa contenute all'interno dell'ammasso, che costituirebbero delle piccole lenti in quella più grande. È proprio su questo effetto che si è concentrato il team, che ha ricercato le lenti a piccola scala presenti in 11 ammassi di galassie.



© ESA

Le osservazioni, effettuate attraverso il telescopio spaziale *Hubble* della NASA e il *Very large telescope* dell'ESO, in Cile, hanno evidenziato effetti fino a dieci volte superiori rispetto a quelli attesi, permettendo di individuare in maniera accurata una distribuzione imprevista della materia oscura negli ammassi.

«Questo lavoro costituisce un salto nella conoscenza della formazione delle strutture nell'Universo e presenta una sfida ai modelli cosmologici» ha commentato Elena Rasia, dell'INAF di Trieste, coautrice dello studio.



## Supercomputer da 1000 qubit, la promessa di IBM

A distanza di circa un anno dalla dichiarazione di Google di aver raggiunto la supremazia quantistica grazie al processore Sycamore a 53 bit quantici, o qubit (si veda *Sapere* n. 1/2020), IBM, l'altra grande azienda impegnata in questa corsa, sposta i riflettori su di sé facendo una promessa: entro il 2023 costruirà un computer da 1000 qubit. L'annuncio è stato accompagnato dalla notizia che il più potente computer quantistico attualmente realizzato dalla compagnia contiene 65 qubit.

Aver reso pubblico questo ambizioso obiettivo comporta un ovvio rischio per IBM, nel caso in cui non riuscisse a rientrare nei tempi

prospettati. Tuttavia l'azienda – evidentemente sicura di sé – ha deciso di rivelare i suoi piani, così clienti e collaboratori sapranno cosa aspettarsi dal futuro. L'idea, concretamente progettata, prevede degli step intermedi: realizzare una macchina da 127 qubit entro il 2021 e una da 433 entro il 2022. «È più di un piano o di una presentazione PowerPoint», ha commentato Darío Gil, il direttore della ricerca di IBM, «è già in esecuzione».

Ma c'è già un ulteriore obiettivo in vista. IBM sta anche lavorando alla preparazione di un criostato in cui contenere un computer quantistico da un milione di qubit. Certamente, realizzare nei tempi promessi il computer da mille qubit renderà meno fantascientifica questa ulteriore conquista, alla quale anche Google sta puntando. La sfida è aperta.

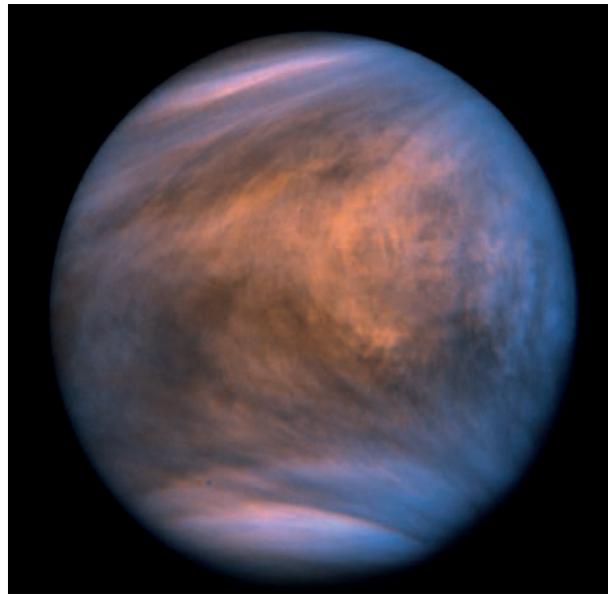


## Fosfina su Venere, è una traccia di vita?

«Non stiamo dicendo di aver trovato la vita su Venere!» ha ritenuto doveroso precisare Sara Seager, vista la peculiarità della scoperta fatta dal team del quale la ricercatrice fa parte. Fino a poco tempo fa le sue parole sarebbero parse fantascientifiche. Eppure il gruppo di ricerca, attraverso un'analisi a distanza dell'atmosfera di Venere, vi avrebbe trovato tracce di fosfina ( $\text{PH}_3$ ), un composto che sulla Terra esiste esclusivamente grazie a processi biologici. Il gruppo di ricerca guidato da Jane S. Greaves, astrofisica dell'Università di Cardiff, ha pubblicato i risultati del suo studio su *Nature Astronomy*.

Venere, con le sue temperature superficiali di oltre 450 °C e anidride carbonica in concentrazioni del 96%, è un pianeta decisamente inospitale. Tuttavia, in regioni prossime all'equatore e a quote di circa 55 km, le condizioni si fanno relativamente meno proibitive, con temperature che si stabilizzano sui 30 °C e una pressione paragonabile a quella terrestre. E proprio nelle nuvole situate in queste zone dell'atmosfera del nostro più prossimo vicino i ricercatori avrebbero individuato la fosfina, attraverso indagini spettroscopiche effettuate utilizzando i telescopi JCMT nelle Hawaii e ALMA in Cile. Entrambi i telescopi osservano lunghezze d'onda inferiori al millimetro, che vanno dall'infrarosso alle microonde, e questo ha permesso agli scienziati di caratterizzare in maniera pressoché univoca questo composto e la sua abbondanza relativa, pari a 20 parti per miliardo.

Misurare i gas in tracce nelle atmosfere degli altri pianeti permette di conoscere condizioni chimiche diverse da quella terrestre e questo ritrovamento, in particolare, rafforza le recenti teorie che la vita possa esistere – o essere esistita – su Venere. La stessa Sara Seager, in un altro lavoro pubblicato lo scorso agosto, aveva puntualizzato che proprio le nuvole venusiane potrebbero costituire un habitat più favorevole per la vita, che potrebbe svilupparsi nelle goccioline situate ad alta quota. Contrariamente a quelle terrestri, infatti, le nuvole di Vene-



© ISAS, JAXA, Akatsuki

re sono permanenti, e costituirebbero pertanto un ambiente alquanto stabile.

Si resta, comunque, nella sfera delle ipotesi. Questi ritrovamenti non provano in maniera certa l'esistenza della vita su Venere, anche se la presenza di fosfina suggerisce quanto meno che una qualche attività – biologica o di altro tipo – si sia verificata. Pur analizzando una vasta gamma di processi chimici non connessi con la vita che avvengono su Venere, il team non ne ha individuato nessuno che giustifichi la formazione di fosfina. Pertanto, come si legge nell'articolo, «la fosfina potrebbe originarsi da processi chimici o fotochimici sconosciuti o, per analogia con la sua origine biologica sulla Terra, potrebbe indicare la presenza di vita». In entrambi i casi si tratterebbe di prospettive appetibili, per le quali nuove missioni su Venere sarebbero sicuramente di aiuto. Come gli stessi ricercatori precisano, il campionamento *in situ*, sia delle nuvole che della superficie, permetterebbe di trovare le zone in cui la fosfina si origina.



SATELLITE

## La matematica del mondo

Dal sistema cardiovascolare ai comportamenti sociali: come la matematica può aiutarci a capire la realtà. E quali risposte non dobbiamo aspettarci.

Intervista di Tommaso Castellani ad **Alfio Quarteroni**, docente presso il Politecnico di Milano e professore emerito all'EPFL di Losanna.

Il suo nome è più volte circolato al di fuori del ristretto circolo dei matematici per la sua capacità di applicare la matematica ai campi più svariati, tra cui aerodinamica, terremoti, medicina. Oltre ad aver vinto numerosi premi e – caso rarissimo – ben due ERC Advanced Grant, i prestigiosi e molto competitivi finanziamenti dell'European Research Council, è membro dell'Accademia dei Lincei e di altre importanti istituzioni scientifiche. Alfio Quarteroni, ci può dire qualcosa sulla differenza tra matematica pura e matematica applicata? Il suo curriculum non assomiglia a quello di molti matematici anche famosi, che si occupano per lo più di questioni tecniche incomprensibili ai profani...

Dal mio punto di vista non c'è una vera separazione tra matematica fondamentale e matematica applicata: c'è invece una differenza di atteggiamento tra matematici puri e matematici applicati. La matematica è unica e, anche se io sono un matematico applicato, mi capita spesso di pensare che se conoscessi più matematica teorica lavorerei meglio. Allo stesso modo, sono convinto che se tante persone che si cimentano su questioni molto teoriche avessero voglia di guardare il mondo con occhi diversi, capirebbero molto più rapidamente che quello che stanno facendo si presta ad essere utilizzato. Insomma, quello che cambia è l'atteggiamento: la matematica è un corpus di conoscenza unico, e nessun ambito tematico vede una separazione tra matematica pura e applicata.

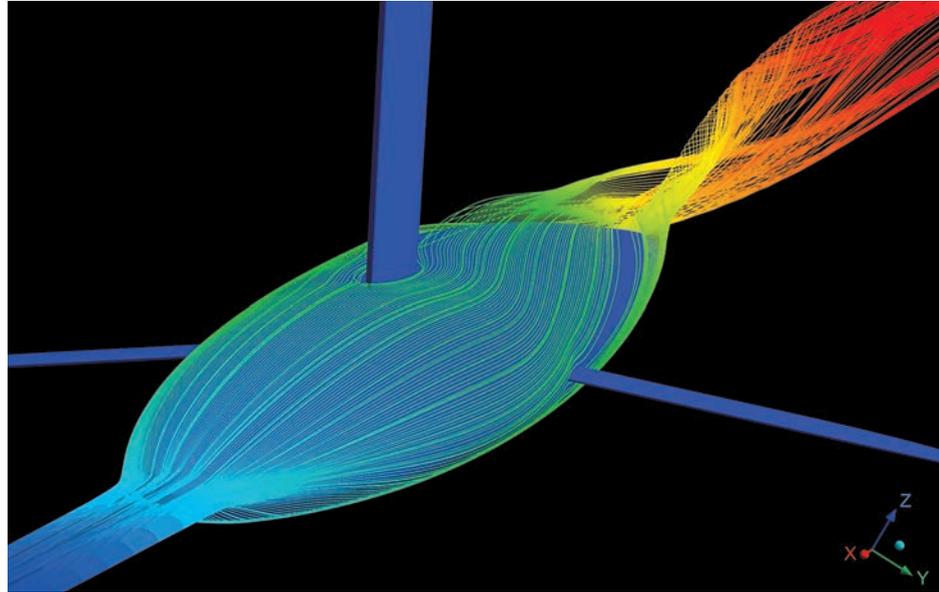
Potremmo dire che il matematico puro si appassiona a un problema e lo vuole risolvere, ma succe-

de di frequente che alla fine non risolve il problema da cui è partito, per esempio perché l'asticella iniziale si rivela troppo alta e sono necessarie delle ipotesi aggiuntive che ne restringono la generalità. A questo punto verranno fatte probabilmente delle semplificazioni che permetteranno di ottenere dei teoremi con dimostrazioni rigorose, che aumenteranno comunque le nostre conoscenze. Il matematico applicato invece tipicamente si cimenta su un problema che gli viene posto da altri, e vuole dare una risposta a *quel* problema. Non può accettare il compromesso di semplificare troppo: può e deve farlo, in maniera consapevole, se la semplificazione non riduce la significatività della



Il matematico Alfio Quarteroni.

domanda che gli era stata posta all'inizio. Se ad esempio deve ottimizzare il profilo di un'ala di aereo per massimizzare la portanza in certe condizioni di moto, a quella risposta deve arrivare. È contento se trova il modo di usare altri strumenti matematici rispetto a quelli a cui aveva pensato all'inizio, ma non può accettare compromessi sul fatto che la sua risposta deve essere significativa.



Simulazione delle linee di flusso intorno al bulbo e alla chiglia di uno yacht di Coppa America (courtesy: N. Parolini, MOX - Politecnico di Milano).

Ancora un esem-

pio per spiegare in che senso la matematica teorica e quella applicata non sono separate. Capita molto spesso che risultati teorici trovati cento o duecento anni fa siano rimasti silenti per tanto tempo, e poi si scopre che sono applicabili in molti campi. Queste applicazioni vanno totalmente al di là della moti-

**Capita spesso che risultati teorici trovati cento o duecento anni fa siano rimasti silenti per tanto tempo, e poi si scopre che sono applicabili in molti campi.**

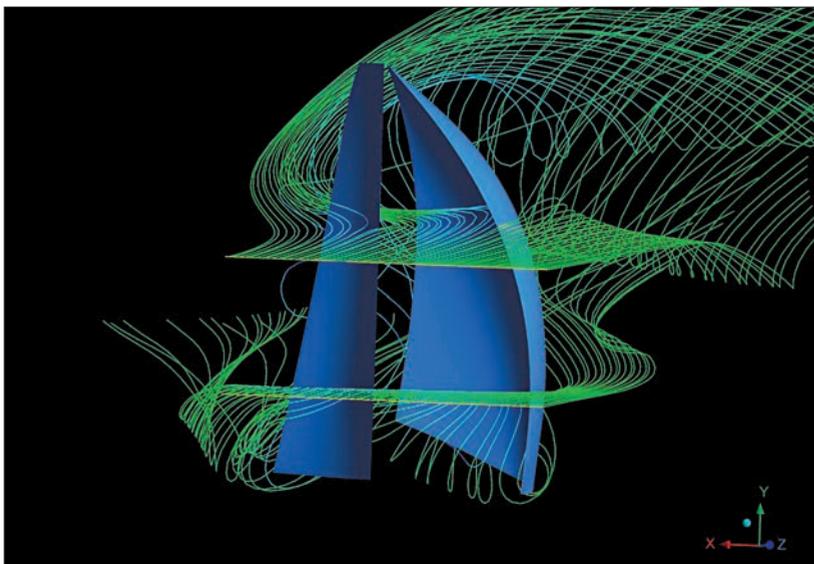
vazione che aveva ispirato quei risultati. La matematica pura non è fine a se stessa; se è buona matematica, prima o poi sarà utilizzata. Anche dopo un tempo magari molto lungo. Per questo forse sarebbe più corretto parlare di applicazioni della matematica.

Le applicazioni della matematica sarebbero state possibili senza l'avvento del computer? Sappiamo che a volte anche i matematici teorici si sono avvalsi di un computer per dimostrare teoremi, ma la matematica applicata ci sembra invece che non possa farne a meno. Qual è il ruolo del computer nel suo lavoro?

Ci sono casi, non molti in verità, in cui per dimostrare un risultato teorico bisogna dimostrare

che sia valido per un certo insieme di situazioni, magari molto grande. In questo caso l'analisi di tutte queste singole situazioni può essere affidata a un computer, che quindi serve in sostanza solo per accelerare un processo, che talvolta può significare renderlo possibile dal punto di vista pratico. È il caso del famoso "teorema dei quattro colori", uno dei primi teoremi a essere stato dimostrato con l'aiuto di un computer. Ma in questi casi il computer non sta necessariamente offrendo nuova conoscenza concettuale.

Dal punto di vista delle applicazioni invece ha un ruolo molto più sostanziale, direi anzi decisivo. Facciamo un passo indietro: nell'Ottocento, quando matematica e fisica non erano ancora separate, vennero trovate delle leggi generali che governano il mondo, ad esempio le equazioni di Maxwell per l'elettromagnetismo, quelle di Navier-Stokes per la meccanica dei fluidi, o più tardi quelle di Schrödinger per l'evoluzione dello stato della materia (particelle, atomi, molecole). Quando furono scoperte, tuttavia, l'applicabilità di queste leggi era molto limitata: si conoscevano le equazioni ma non si era in grado di risolverle. Erano, per così dire, una conoscenza intellettuale che però non poteva essere usata per studiare situazioni pratiche. Nella seconda metà del secolo scorso, con la comparsa dei computer, le cose sono cambiate. Per spiegare meglio, la difficoltà era dovuta al fatto che le soluzioni di questi problemi dipen-



Simulazione numerica dell'interazione vento-vele in regime di poppa per uno yacht di Coppa America (courtesy: D. Detomi e N. Parolini, EPFL e MOX - Politecnico di Milano).

dono da un numero infinito di variabili e non sono quindi trattabili. Con metodi di analisi numerica, accettando di fare delle approssimazioni, siamo in grado di ridurli a una dimensione finita, ma spesso è comunque molto grande (possiamo avere sistemi con anche un miliardo di equazioni!) e il problema resta impossibile da affrontare. Solo con il computer questi sistemi di equazioni sono diventati risolvibili. In un certo senso, tante teorie sono diventate utili oltre che belle: dall'aver solo le equazioni, possiamo ora avere anche le loro soluzioni, pur se approssimate.

Qualche purista potrà obiettare che una soluzione approssimata non ha davvero valore, o comunque vale meno di una soluzione esatta. L'obiezione può aver senso a livello teorico, ma non in pratica: quante volte, nella vita quotidiana, usiamo una soluzione "esatta"? Se vogliamo sapere quanto tempo ci serve per andare da casa al luogo di un appuntamento, la precisione con cui dobbiamo calcolarlo ci deve permettere di arrivare, che so, cinque minuti prima: non abbiamo bisogno di sapere il tempo di percorrenza al millesimo di secondo! Se invece dobbiamo regolare il comportamento di un satellite che deve trovarsi in una certa posizione con una precisione del centesimo di secondo, sarà necessario fare un calcolo più preciso: l'approssimazione di cui abbiamo bisogno cambia in funzione del problema. Non esistono, in pratica soluzioni esatte, l'importante è essere in grado di valutare l'incertezza con

cui le conosciamo. La soluzione "esatta", matematicamente ineccepibile, può essere esteticamente appagante ma non ha vera utilità pratica.

Del resto, prima ancora di risolvere le equazioni, anche il modello matematico che usiamo per descrivere il problema (e quindi per scrivere le equazioni) è frutto di una semplificazione. La non esattezza della soluzione dipende allora in sostanza da tre fattori: il modello (necessariamente non esatto), l'approssimazione numerica, e infine l'uso del calcolatore, che compie un'approssimazione su ogni singola operazione. La cosa importante è

essere in grado di valutare tutti questi errori in modo che la soluzione finale sia all'interno dell'intervallo che si ritiene significativo per il problema stesso.

Per rispondere alla domanda iniziale: oggi, senza il computer, come professionista sarei bloccato. Nessuna delle cose che faccio potrebbe essere fatta.

**A livello storico, quindi, è con il computer che è nata la matematica applicata?**

Sì e no. Matematici applicati già esistevano nell'Ottocento e nel primo Novecento, specialmente nel mondo anglosassone. Questi matematici cercavano le soluzioni delle equazioni con metodi approssimati, attraverso strumenti matematici come le serie di Fourier o lo sviluppo della soluzione incognita in autofunzioni. Anche in questo caso, la serie di autofunzioni che approssima una funzione è infinita. Senza computer se ne calcolavano diciamo un paio di termini, facendo tantissimi calcoli a mano. Era un grosso lavoro e dava risultati a volte molto grossolani.

Il computer ha permesso di evitare questo complicato procedimento, ragionando non più in termini di autofunzioni ma in termini numerici (tecnicamente, passando da una rappresentazione globale a una rappresentazione per punti). Nessun essere umano avrebbe mai potuto eseguire calcoli del genere, che spesso richiederebbero un tempo superiore a quello di una vita intera!

Ma il ruolo del computer non finisce qui. Oltre a risolvere i problemi dell'analisi numerica già nota, allo stesso tempo stimola lo sviluppo di nuova analisi numerica. È uno strumento potentissimo che spinge a migliorare i metodi di risoluzione: poiché i metodi sono sempre più sofisticati, si sviluppano nuovi modelli, cioè nuova matematica. Infine, non dimentichiamo che la nuova matematica permette lo sviluppo di nuovi tipi di computer (pensiamo ai computer vettoriali, i computer paralleli, o perfino i computer quantistici). Si tratta quindi di un processo virtuoso: ognuno di questi campi stimola e alimenta gli altri, favorendo continui progressi in ognuno di essi. Proprio su questi temi sto scrivendo il libro *Algoritmi per un nuovo mondo* che uscirà nei prossimi mesi per la nuova collana "Le grandi voci" di Edizioni Dedalo.

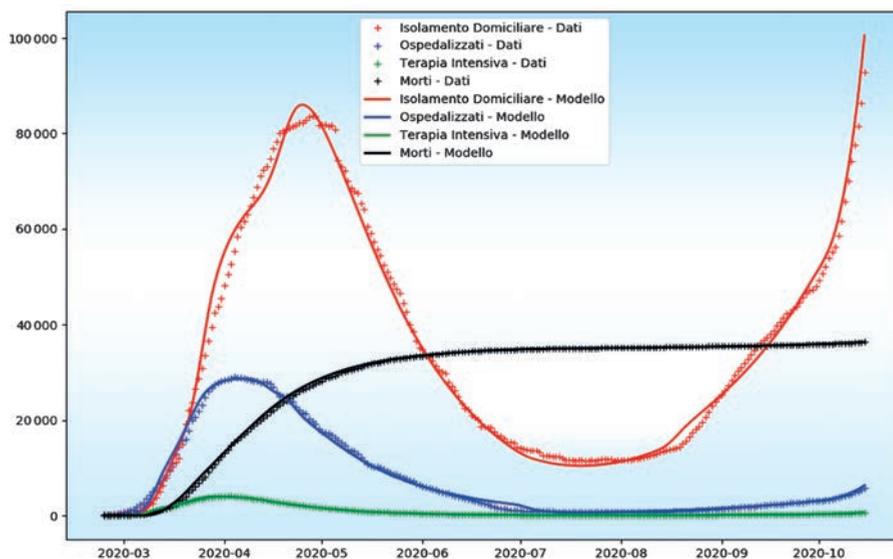
Quali sono i limiti dell'approccio matematico ai problemi reali? Ci può fare qualche esempio, magari parlandoci dell'uso della modellizzazione matematica della pandemia di Covid, che ha creato qualche difficoltà nell'opinione pubblica?

Il Covid fornisce un ottimo esempio per spiegare come funziona la modellizzazione matematica. Facciamo una premessa: un modello matematico ha l'ambizione di tradurre in equazioni un processo reale, con l'obiettivo di descrivere un fenomeno complesso e magari – ma non sempre – riuscire a fare delle previsioni sul suo comportamento futuro. Si hanno sostanzialmente tre fattori, di cui il modello è solo quello centrale. Il primo è rappresentato dai dati, che caratterizzano il singolo caso: se studiamo le correnti del Po o dello stretto di Messina potremmo usare lo stesso modello, ma i dati iniziali da inserire sono del tutto diversi. Il secondo è appunto il modello, che descrive il processo che vogliamo

studiare; esso ha un valore universale ed è basato su leggi della fisica. Il terzo sono le soluzioni ottenute dal modello universale ma calcolate in corrispondenza di una specifica scelta di dati (il Po piuttosto che lo stretto, riprendendo gli esempi di prima).

Nel caso del Covid il modello è costruito con delle equazioni che teoricamente descrivono gli scambi tra diverse categorie di persone, tecnicamente chiamate *compartimenti*: i sani suscettibili di contrarre il virus, gli infetti, i guariti, i defunti, ed eventualmente altri come gli ospedalizzati, le persone in quarantena, ecc. Il modello deve offrire delle leggi matematiche che leghino tra loro le numerosità di questi compartimenti. Quanti modelli possiamo avere? Tantissimi. Questi modelli possono avere 3 come 10 equazioni differenziali, una per compartimento. Poi naturalmente potremmo replicare il modello per ogni entità geografica che vogliamo considerare, ad esempio i 100 capoluoghi di provincia italiani. Anche la descrizione dell'interazione tra compartimenti può cambiare moltissimo da un modello all'altro. Quali sono i dati? Se vogliamo capire che succederà da oggi in poi, i dati sono quelli di cui disponiamo oggi,

**Il Covid fornisce un ottimo esempio per spiegare come funziona la modellizzazione matematica.**



Simulazione dello sviluppo dell'epidemia Covid-19 in Italia (courtesy: team EpiMOX - Politecnico di Milano).

ciò la storia precedente: tutte le informazioni che hanno a che vedere con contagiati, guariti, morti, ecc. Tutti questi dati si inseriscono nel modello.

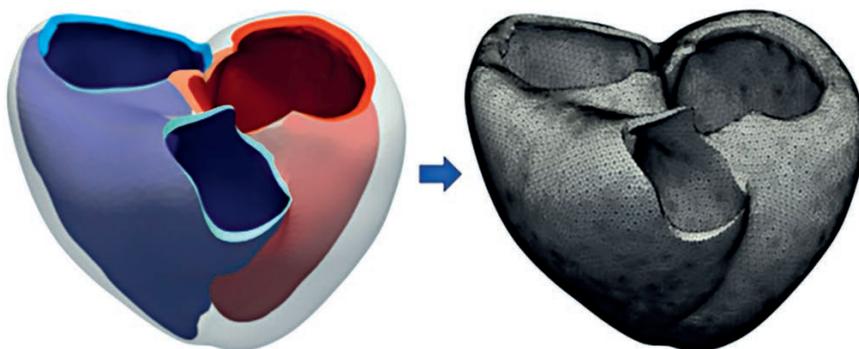
Ora dobbiamo introdurre un'altra complicazione: siccome non stiamo descrivendo una legge fisica, il modello dipende da altri numeri detti *parametri*. Le leggi di Newton o Maxwell non hanno parametri, mentre un modello per l'evoluzione del Covid ne ha molti. I parametri vanno calibrati, e la calibrazione si fa, ancora una volta, sulla base dei dati. Se i dati non sono buoni, siamo nei guai. In informatica si dice "*garbage in, garbage out*". Purtroppo, nel caso del Covid, i dati sono molto poco accurati. Ad esempio, non sappiamo quanti sono esattamente i contagiati: sappiamo chi è positivo ai tamponi fatti, ammesso che siano fatti bene, ma di tutti quelli a cui non è stato fatto il tampone non sappiamo nulla. Anche sulle vittime non abbiamo dati certi: quanti sono davvero i morti per Covid e quanti sono morti invece *anche* per Covid? Uno dei grossi problemi di questa pandemia è che siamo in presenza di dati molto difficili da utilizzare. Non dimentichiamo che nei primi mesi della pandemia alcuni Paesi hanno addirittura nascosto i dati, oppure semplicemente utilizzavano metodi di conteggio diversi, come il Regno Unito in cui inizialmente non si calcolavano i morti delle RSA.

Il secondo punto debole del nostro modello, come tutti quelli che descrivono delle dinamiche sociali, è che ha dentro molta incertezza. Non è un modello deterministico, al contrario di molti modelli fisici: cioè a partire dagli stessi dati iniziali non è detto che dia sempre lo stesso risultato. La variabilità è dovuta alle troppe incertezze su elementi fondamentali, ad esempio quanto la gente si sta muovendo in questo momento da una città all'altra, da un quartiere all'altro con mezzi pubblici, o da una famiglia all'altra. Sono tutti aspetti importanti ma oggettivamente difficilissimi da determinare. Un'altra incertezza è dovuta alla grande variabilità della reazione individuale al virus anche a parità di carica virale: conosciamo pochissimo il processo biologico della malattia.

Dentro il problema abbiamo dunque tantissimi elementi di incertezza, o meglio di *stocasticità*. Quindi non potremo mai aspettarci che il modello sia in grado di dare delle risposte sicure. Se oggi siamo in grado di calcolare le proprietà aerodinamiche di un certo aereo con il margine di precisione necessario, perché sappiamo quale modello usare e come realizzare la sua approssimazione numerica, nel caso della pandemia di Covid, persino col computer migliore del mondo ci sono troppi elementi di incertezza per poter dare una risposta. Ma allora a che serve fare un modello matematico del Covid?

In questo caso c'è stato un problema di comunicazione, in cui spesso gli scienziati non si sono resi conto che le persone non sanno cosa sia un modello matematico, e quest'ignoranza ha creato delle aspettative sbagliate. Quando mi chiedono se posso dire quanta gente sarà contagiata tra due settimane rispondo immediatamente che non sono in grado di farlo. Il modello può descrivere tanti scenari nell'ambito delle sue limitazioni, da cui il massimo che possiamo ottenere è un *range* di possibilità: il caso peggiore, il caso migliore. Se accettiamo questo, ci rendiamo conto che non è poco. I politici possono usare questi scenari come informazioni per prendere responsabilmente delle decisioni, insieme a tutte le altre informazioni di cui dispongono. Questo, a mio avviso, è il senso di utilizzare modelli matematici per simili problemi.

Dando un'occhiata alle sue pubblicazioni ci colpisce la grande varietà di campi a cui ha applicato le sue conoscenze matematiche. Come si evince dal suo ultimo libro *Le equazioni del cuore, della pioggia e delle vele* (pubblicato da Zanichelli), lei



Ricostruzione geometrica del ventricolo destro e sinistro di un cuore umano (courtesy: M. Fedele, MOX - Politecnico di Milano).

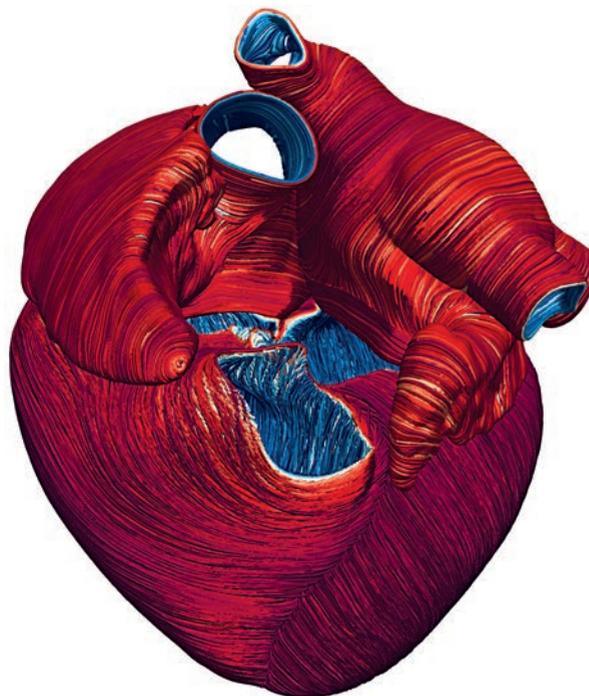
si occupa anche di matematica del cuore e del sistema circolatorio: ci può dire qualcosa sull'uso della matematica in biologia, che è un campo in cui l'approccio quantitativo sembra essere una vera sfida?

La principale difficoltà è che in biologia, o in medicina, non abbiamo quelle leggi fondamentali che invece abbiamo in fisica. Ci sono tanti meccanismi ancora sconosciuti, e ci dobbiamo accontentare di descriverli senza poter contare sui cosiddetti principi primi.

Usando alcune semplificazioni concettuali, sono stati costruiti modelli matematici per la proliferazione delle cellule cancerogene, per il funzionamento del cuore, per il sistema nervoso e per tanti altri meccanismi biologici. Possono essere modelli completamente deterministici o parzialmente stocastici, che cercano di descrivere con equazioni il funzionamento di organismi che si comportano in maniera evidentemente non deterministica. Non siamo delle macchine che ripetono il loro comportamento a parità di condizioni iniziali: abbiamo delle risposte nervose, sensoriali, metaboliche che cambiano continuamente. Il modello non può che descrivere in maniera inevitabilmente semplificata un processo estremamente complesso. Eppure riesce a trovare delle risposte quantitative che possono indirizzare il clinico a prendere decisioni, incrociandole con la sua conoscenza e con gli strumenti di indagine a sua disposizione.

Tornando alla domanda iniziale, i processi biologici sono quindi tra i più difficili da descrivere con modelli matematici, insieme a quelli di cui parlavamo poco fa, cioè i processi sociali. Anche in questo caso l'interazione tra una dinamica di comportamento individuale e una dinamica di comportamenti collettivi (l'interazione tra gli individui) genera un'enorme complessità.

Un'altra difficoltà comune ai processi biologici e sociali è che sono processi *multiscala*. Il nostro cuore, ad esempio, può essere descritto a vari livelli: a livello microscopico, cioè di ogni singola cellula o quanto meno di ogni singolo miofilamento che è soggetto a una polarizzazione elettrica, e poi via via a livello mesoscopico e macroscopico, ciascuno con le sue dinamiche di funzionamento. La stessa cosa vale nei comportamenti sociali: si ha l'individuo, poi i gruppi, poi la società nel suo complesso.



Ricostruzione matematica del campo di fibre in un cuore umano (courtesy: R. Piersanti, MOX - Politecnico di Milano).

Infine non dimentichiamo l'effetto stocastico di cui abbiamo parlato prima, cioè l'imprevedibilità di elementi che possono cambiare completamente la reazione del sistema. Possiamo costruire un modello magari ottimo per descrivere il comportamento della Borsa domani, ma

**La matematica applicata ci aiuta ad accettare i limiti della scienza e a trovare soluzioni utili.**

se domattina esce una *fake news* in cui si dice che il Primo ministro di un Paese importantissimo ha un problema di salute, ci sarà inevitabilmente un crollo che il nostro modello non poteva prevedere. Dobbiamo allora introdurre nel modello degli elementi addizionali e rinunciare ad avere una soluzione deterministica, esplorando dei *range* di possibili soluzioni nell'intorno di soluzioni di tipo deterministico. La matematica applicata ci aiuta anche ad avere consapevolezza dei limiti della scienza e ad accettarli in una logica di ragionamento costruttivo, finalizzato a trovare soluzioni ragionevoli e comunque utili.

# Il destino del carbonio negli ecosistemi terrestri

Gli ecosistemi terrestri svolgono un ruolo fondamentale nella regolazione del ciclo del carbonio e sono, per questo motivo, preziosi alleati nella lotta al cambiamento climatico.

Il cambiamento climatico rappresenta una seria minaccia per l'umanità e la ricerca di efficaci strategie di mitigazione e adattamento costituisce uno dei principali obiettivi per garantire la sopravvivenza delle generazioni future. Il Comitato Intergovernativo per i Cambiamenti Climatici (IPCC) delle Nazioni Unite afferma che il riscaldamento del sistema climatico è ormai un fenomeno inequivocabile e sottolinea come possa essere ricondotto, con un grado di attendibilità molto elevato, all'influenza dell'uomo e delle sue attività [1].

Le concentrazioni atmosferiche dei principali gas a effetto serra, come anidride carbonica o diossido di carbonio (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) e protossido di azoto (N<sub>2</sub>O), sono aumentate a livelli che non hanno precedenti negli ultimi 800.000 anni, modificando il bilancio radiativo terrestre, ovvero l'equilibrio tra la radiazione solare ricevuta e quella rilasciata dalla Terra, con conseguenti impatti su tutti gli ecosistemi terrestri e marini. In particolare, la concentrazione di CO<sub>2</sub> nell'atmosfera è aumentata di circa il 40% rispetto all'epoca preindustriale a causa, principalmente, dell'impiego di combustibili fossili e dei cambiamenti nell'uso del suolo, in primis la deforestazione.

Per comprendere come questo incremento possa influenzare il ciclo biogeochimico del carbonio e quindi il clima della Terra è necessario studiare il "destino" della CO<sub>2</sub> immessa nell'atmosfera. Una parte di CO<sub>2</sub> (circa il 24%) viene assorbita dagli oceani, dove si scioglie provocando tra l'altro la loro acidificazione, un'altra parte (circa il 30%) viene assorbita dagli ecosistemi terrestri, la rimanente (circa

**Andrea Scartazza e  
Olga Gavrichkova,**  
Istituto di Ricerca  
sugli Ecosistemi Terrestri  
(IRET), CNR

il 45%) viene accumulata nell'atmosfera, causando un incremento dell'effetto serra.

L'essere umano, come principale responsabile di questo fenomeno, ha l'imperativo morale di attuare i percorsi di mitigazione necessari a rallentare l'incremento

di CO<sub>2</sub> e degli altri gas serra nell'atmosfera per mantenere il riscaldamento globale sotto la soglia di 2 °C: la comunità scientifica internazionale ritiene infatti questa una soglia di non ritorno, in grado di compromettere irreversibilmente il clima della Terra. Per tale ragione, tra gli obiettivi dello sviluppo sostenibile (*Sustainable Development Goals*) dell'Agenda 2030 delle Nazioni Unite vi è quello di promuovere azioni, a tutti i livelli, in grado di contrastare il cambiamento climatico integrando misure di mitigazione nelle politiche, strategie e pianificazioni nazionali.

Gli interventi necessari per contrastare l'incremento di CO<sub>2</sub> nell'atmosfera richiedono un approccio integrato con azioni rivolte, da una parte, ad azzerarne le emissioni (*carbon source*) e, dall'altra, ad aumentare la capacità di assorbimento e stoccaggio da parte degli oceani e degli ecosistemi terrestri (*carbon sink*).

**La concentrazione di  
CO<sub>2</sub> nell'atmosfera  
è aumentata di  
circa il 40% rispetto  
all'epoca  
preindustriale.**

## Fra sorgenti e serbatoi di CO<sub>2</sub>

Per studiare le dinamiche della CO<sub>2</sub> e degli altri gas serra nell'atmosfera e la ripartizione del *carbon sink* tra i differenti comparti (atmosfera, ecosistemi terrestri e oceani), sono state create apposite reti internazionali di osservazione in campo ambientale, tra cui l'infrastruttura di ricerca europea Integrated Carbon Observation System-European Research Infrastructure Consortium (ICOS-ERIC). Questa infrastruttura serve a quantificare e comprendere il bilancio dei gas serra attraverso un network di stazioni di misura in grado di registrare e fornire in continuo dati di alta qualità sul ciclo del carbonio, sulle emissioni di gas serra e sulla loro concentrazione atmosferica su scala paneuropea. Infatti, in seguito ai recenti Accordi di Parigi sul clima e alle successive Conferenze delle Parti (COP), è emersa l'importanza di coinvolgere i decisori politici e tutti i soggetti interessati nel mettere in atto le azioni necessarie a ridurre le emissioni di gas serra nell'atmosfera e a incentivare le misure finalizzate a favorire il loro stoccaggio.

Una parte rilevante delle attività di ICOS riguarda l'integrazione, attraverso un percorso di validazione dei dati e di certificazione, delle stazioni atmosferiche, ecosistemiche e marine, che per poter far parte della rete devono rispettare adeguati standard qualitativi e quantitativi. Nonostante l'enorme mole di dati e ricerche disponibili sull'argomento, i ricercatori si scontrano spesso con dati incompleti, disomogenei o di difficile accesso. Questi network di misura, invece, usano protocolli standard altamente qualificati, offrendo alla comunità scientifica e civile uno strumento affidabile per costruire politiche di mitigazione efficaci e tempestive a livello nazionale e/o locale.

Attualmente, la rete ICOS-ERIC copre 12 Paesi europei con oltre 140 stazioni di misura, di cui 17 in Italia, e i dati raccolti vengono resi disponibili attraverso il *Carbon Portal* situato a Lund, in Svezia. In futuro ICOS intende aumentare la copertura geografica della rete e gli standard delle misure rilevate, oltre a promuovere la divulgazione e l'uso dei dati per studi scientifici che possano chiarire i fattori antropici e naturali che regolano il bilancio del carbonio su differenti scale spaziali e temporali.

Le stazioni di misura dei gas serra di ICOS e di altri network internazionali si basano sul metodo



Sistema di *Eddy Covariance* costituito da anemometro sonico e analizzatore di gas a infrarossi con i sensori meteo ausiliari.

della "correlazione turbolenta" (*Eddy Covariance*), la tecnica micrometeorologica maggiormente utilizzata per determinare in tempo reale i flussi di materia e di energia di un ecosistema [2]. Tale misura viene realizzata tramite sensori (anemometri sonici e analizzatori di gas) ad alta frequenza, capaci di misurare istante per istante la velocità del vento e la concentrazione di uno o più costituenti dell'atmosfera. La tecnica mette in correlazione una misura di concentrazione di una grandezza scalare (come la concentrazione di CO<sub>2</sub> o di un altro gas) con la velocità della componente verticale del vento. Tramite le stazioni della rete è quindi possibile misurare in continuo le concentrazioni dei gas serra presenti in atmosfera e i flussi netti di questi gas tra l'atmosfera e gli ecosistemi marini e terrestri. Il dato di maggiore interesse è la

stima di quanto il sistema sotto osservazione – una foresta, un campo agricolo, un prato, una laguna – è efficiente nell'assorbire  $\text{CO}_2$  dall'atmosfera funzionando come serbatoio di carbonio su scala annuale e inter-annuale.

#### Carbonio che viene, carbonio che va

Il potenziamento del serbatoio di carbonio terrestre può essere perseguito con interventi nel settore agricolo e forestale finalizzati a migliorare l'assorbimento di  $\text{CO}_2$  e lo stoccaggio del carbonio negli agroecosistemi garantendo il loro adattamento a condizioni di crescita in costante mutamento. Esempi possono essere le pratiche agricole finalizzate al mantenimento/ripristino del contenuto di sostanza organica nei suoli, il rimboschimento e la gestione sostenibile di foreste e pascoli.

L'insieme delle aree agricole del pianeta attualmente conserva circa 600 Gt (miliardi di tonnellate) di carbonio nel primo metro di profondità del terreno; si prevede che il potenziale incremento del 4 per mille della capacità di stoccaggio di queste aree (circa 2,5 Gt C/anno), realizzato attra-

verso corrette pratiche agricole, porterebbe ad assorbire circa il 30% delle emissioni di gas serra [3].

Le foreste occupano approssimativamente il 30% delle terre emerse e sono responsabili di circa due terzi della produttività primaria di

tutti gli ecosistemi terrestri (il 40% circa di quella globale), che esprime la velocità con la quale l'energia solare viene convertita in sostanza organica attraverso la fotosintesi; negli ultimi decenni le foreste hanno assorbito tra il 20 e il 30% delle emissioni di gas serra generate dalle attività umane. I sistemi forestali hanno tempi di risposta molto più lunghi rispetto ai sistemi agricoli a causa della vita media degli alberi e del maggiore tempo di permanenza del carbonio nel suolo. Nell'articolo 3.3 del Protocollo di Kyoto è specificato come i Paesi industrializzati abbiano l'obbligo di contabilizzare il bilancio tra assorbimenti ed emissioni di

**Il potenziamento del serbatoio di carbonio terrestre può essere perseguito con interventi nel settore agricolo e forestale.**



Foresta di faggio e torre con sistema di *Eddy Covariance* per la misura dei flussi netti di  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$  tra ecosistema e atmosfera.

carbonio provenienti dalla realizzazione di nuove piantagioni forestali su terreni già in precedenza forestali (riforestazione) e non (afforestazione), al netto delle emissioni derivanti dai processi di deforestazione.

Anche altri ecosistemi terrestri, come le praterie, possono costituire un importante serbatoio per il carbonio, in grado di mantenere tassi relativamente elevati di sequestro di CO<sub>2</sub> dall'at-

mosfera durante anni caratterizzati da estremi climatici, come nel caso delle praterie montane [4]. I principali bacini di stoccaggio di carbonio nelle praterie sono nel sottosuolo e il tempo di permanenza del carbonio in questi ecosistemi è quindi potenzialmente molto elevato. Tuttavia, le praterie in Europa sono oggi soggette a mutamenti radicali che ne hanno aumentato la vulnerabilità a causa, soprattutto, dell'abbandono delle tradizionali attività pastorizie ad alta quota, in combinazione con gli effetti dei cambiamenti climatici.

Conservazione e gestione delle riserve di carbonio negli ecosistemi terrestri sono aspetti prioritari nelle azioni di contrasto al cambiamento climatico che devono essere accompagnate dallo studio approfondito del destino del carbonio negli ecosistemi con tecniche precise e affidabili.

La capacità di assorbire CO<sub>2</sub> negli ecosistemi terrestri è determinata dal bilancio tra quanto carbonio entra nel sistema tramite il processo di fotosintesi delle piante e quanto ne esce a causa dei vari flussi respiratori. La tecnica della correlazione turbolenta fornisce una stima del bilancio del carbonio di un ecosistema attraverso la misura dello scambio netto di CO<sub>2</sub> tra l'ecosistema e l'atmosfera. Per comprendere i meccanismi che regolano questo scambio, è necessario caratterizzare i flussi individuali in entrata e in uscita, ovvero l'assorbimento fotosintetico e l'allocatione del carbonio nel sistema pianta-suolo da un lato, e il rilascio di CO<sub>2</sub> nell'atmosfera in seguito alla respirazione di piante, batteri, funghi e animali dall'altro.

I flussi individuali sono influenzati dall'interazione tra la componente biotica (la vegetazio-



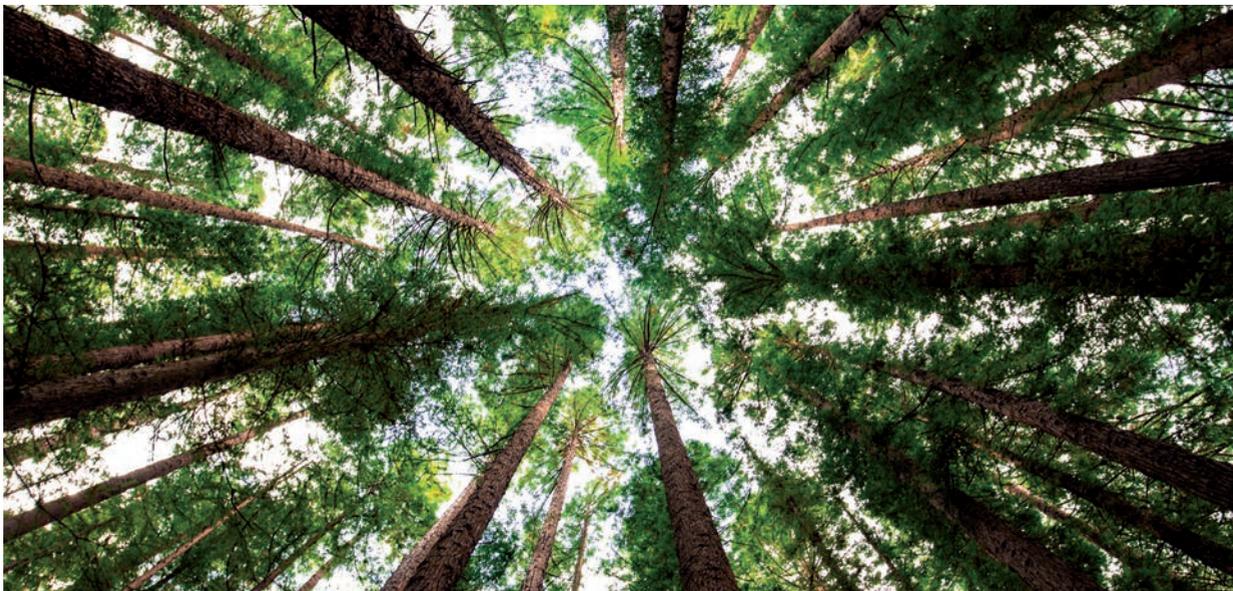
Praterie montane e sistema di *Eddy Covariance*.

ne e i microrganismi del suolo) e quella abiotica (temperatura, precipitazioni, nutrienti, presenza di inquinanti, ecc.), da cui dipendono la capacità di sequestro del carbonio, il suo percorso nel sistema pianta-suolo-atmosfera, il tempo di residenza nei vari comparti prima di tornare in atmosfera e la resilienza ai cambiamenti climatici dello specifico ecosistema. Si prevede, ad esempio, che l'incremento delle temperature, la riduzione della disponibilità delle risorse idriche e le modifiche di altri importanti fattori ambientali associati al cambiamento climatico potranno impattare in modo differente sui singoli processi da cui dipendono la capacità di assorbimento e il tempo di residenza del carbonio nell'ecosistema. Per ottenere queste informazioni, le tecniche micrometeorologiche devono essere integrate e supportate da altre metodologie di indagine.

### Migliorare il tracciamento del carbonio

Gli isotopi stabili del carbonio costituiscono dei traccianti naturali in grado di fornire informazioni sul destino di questo elemento negli ecosistemi terrestri.

La CO<sub>2</sub> atmosferica, infatti, è composta per circa il 98,9% dall'isotopo stabile leggero del carbonio <sup>12</sup>C (<sup>12</sup>CO<sub>2</sub>) e circa l'1,1% dall'isotopo stabile pesante del carbonio <sup>13</sup>C (<sup>13</sup>CO<sub>2</sub>). Durante la fissazione fotosintetica di CO<sub>2</sub>, le piante preferiscono l'isotopo leggero <sup>12</sup>C e di conseguenza i prodotti fotosintetici contengono meno



Gli ecosistemi terrestri sono fondamentali per regolare il ciclo del carbonio.

$^{13}\text{C}$  rispetto alla  $\text{CO}_2$  atmosferica assorbita dalla pianta. Questo processo, noto come discriminazione isotopica, dipende principalmente dai frazionamenti che gli isotopi del carbonio subiscono durante l'ingresso e la diffusione della  $\text{CO}_2$  nella foglia e durante il processo enzimatico con cui la  $\text{CO}_2$  atmosferica viene trasformata in zuccheri per via fotosintetica. La discriminazione isotopica dipende dal bilancio tra la capacità fotosintetica e il grado di apertura degli stomi, attraverso i quali la  $\text{CO}_2$  entra nella foglia. Entrambi questi processi sono, a loro volta, fortemente influenzati dall'ambiente (per esempio disponibilità di acqua e di nutrienti, temperatura di crescita, presenza di inquinanti). Il rapporto isotopico tra  $^{13}\text{C}$  e  $^{12}\text{C}$  negli zuccheri fornisce quindi una stima dell'efficienza del processo fotosintetico e delle sue interazioni con l'ambiente circostante. Gli zuccheri vengono trasferiti dal-

**Gli isotopi stabili del carbonio sono traccianti naturali in grado di fornire informazioni sul "destino" di questo elemento negli ecosistemi terrestri.**

le foglie agli altri organi della pianta (fusto, rami, radici, ecc.), dove sono utilizzati per la sintesi di nuovi composti organici (cellulosa, amido, lignina, proteine, lipidi, ecc.) e per produrre l'energia necessaria a sostenere i processi metabolici (respira-

zione autotrofa). Quindi, l'aumento dell'abbondanza del  $^{13}\text{C}$  negli zuccheri fogliari, nei vasi floematici, nella  $\text{CO}_2$  respirata o nel legno formato in determinati anni può indicare ad esempio la presenza di stress idrico o altri tipi di stress che influenzano l'apertura stomatica e l'attività fotosintetica della pianta.

In seguito al processo di rizodeposizione (con cui le piante trasferiscono al terreno essudati radicali) e alla morte della pianta o di suoi organi – foglie, rami, radici – il carbonio organico di origine fotosintetica subisce profonde trasformazioni ad opera della macrofauna (soprattutto insetti) e microrganismi (protozoi, batteri e funghi) del suolo; infine, viene liberato nuovamente nell'atmosfera sotto forma di  $\text{CO}_2$  (respirazione eterotrofa). L'abbondanza in  $^{13}\text{C}$  della  $\text{CO}_2$  rilasciata dall'ecosistema in seguito alla respirazione eterotrofa e autotrofa fornisce informazioni sul contributo delle diverse componenti della pianta e del suolo ai flussi netti dell'ecosistema, oltre che sulle tempistiche e sulle modalità con cui il carbonio fissato dalla pianta viene trasferito nei vari organi e infine nuovamente rilasciato nell'atmosfera come  $\text{CO}_2$ . Queste informazioni sono di fondamentale importanza per comprendere gli effetti dei fattori antropici e naturali sul bilancio netto del carbonio nell'ecosistema in studio e per valutare il contributo delle diverse componenti dell'ecosistema nel mitigare l'aumento dei gas serra e, di conseguenza, i cambiamenti climatici.



Camere di fumigazione per la marcatura isotopica con composti arricchiti in  $^{13}\text{C}$ .



Un'altra affascinante applicazione degli isotopi del carbonio finalizzata a studiare il destino di questo elemento nella pianta e nell'ecosistema è la marcatura isotopica con composti arricchiti in  $^{13}\text{C}$ . Il metodo prevede che intere piante o loro porzioni vengano esposte, o "fumigate", con  $\text{CO}_2$  avente un rapporto tra  $^{13}\text{C}$  e  $^{12}\text{C}$  profondamente diverso rispetto all'atmosfera. La  $\text{CO}_2$  di fumigazione può essere molto arricchita o impoverita in  $^{13}\text{C}$ , in modo che gli zuccheri portino questo segnale di marcatura isotopica alterato alla partenza. Gli zuccheri marcati vengono trasportati e distribuiti tra i vari organi all'interno della pianta e nel sistema pianta-suolo analogamente a quanto accade ai non marcati, ma la marcatura rende possibile tracciare il movimento del carbonio all'interno della pianta e nel suolo identificando i comparti dove gli zuccheri sono trasportati e determinando la velocità di arrivo e il tempo di permanenza.

I dati sull'arricchimento in  $^{13}\text{C}$  dei vari comparti di pianta e suolo e dei flussi respiratori permettono di quantificare la distribuzione del carbonio di nuova acquisizione nel sistema in studio, cioè la sua allocazione [5]. Abbinando la marcatura isotopica con esperimenti manipolativi sulle piante e variando le condizioni ambientali di crescita (ad esempio la temperatura, il regime idrico, la salinità e qualità del suolo, le pratiche gestionali) e l'interazione con altre specie vegetali e non vegetali (ad esempio funghi, batteri, animali al pascolo) è possibile studiare i cambiamenti nella strategia di allocazione del carbonio nel sistema pianta-suolo-atmosfera in condizioni ottimali e in presenza di fattori di stress.

complesse. In questi casi, l'uso dell'abbondanza naturale degli isotopi stabili rimane la soluzione più pratica per studiare l'allocazione del carbonio.

I dati raccolti tramite le varie tecniche di indagine sono comunque fondamentali per elaborare modelli previsionali al fine di contrastare l'incremento dei gas serra nell'atmosfera e promuovere la gestione sostenibile degli ecosistemi. La lotta ai cambiamenti climatici e la ricerca di adeguate strategie di mitigazione non riguardano un gruppo ristretto di persone ma coinvolgono tutta l'umanità, per cui ognuno di noi è chiamato a fornire il suo contributo. Affinché ciò sia possibile, è necessario creare un "ponte" tra la comunità scientifica, i decisori politici e l'intera comunità civile.

#### Riferimenti bibliografici

- [1] IPCC, *Climate Change 2014, Mitigation of Climate Change*, Cambridge University Press, New York 2014.
- [2] D. BALDOCCHI, "Measuring fluxes of trace gases and energy between ecosystems and the atmosphere. The state and future of the Eddy Covariance method", *Global change biology*, 20, 12, 2014, pp. 3600-3609.
- [3] B. MINASNY *et al.*, "Soil carbon 4 per mille", *Geoderma*, 292, 2017, pp. 59-86.
- [4] J.-F. SOUSSANA *et al.*, "Full accounting of the greenhouse gas ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$ ) budget of nine European grassland sites", *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 121, 1-2, 2007, pp. 121-134.
- [5] O. GAVRICHKOVA, A. SCARTAZZA *et al.*, "When the Mediterranean becomes harsh: Heat pulses strongly affect C allocation in plant-soil-atmosphere continuum in *Eucalyptus camaldulensis*", *Environmental and experimental botany*, 162, 2019, pp. 181-191.

Un limite di questa tecnica consiste nel fatto che il metodo della marcatura isotopica viene generalmente applicato a piante di dimensioni ridotte, come specie erbacee, piccoli alberi e arbusti. Esperimenti su alberi di grandi dimensioni e maturi sono possibili ma richiedono costi più elevati e infrastrutture più

## Intelligenza artificiale: i nodi etici e giuridici

Quando una macchina può essere definita intelligente? Lo sviluppo di sistemi di intelligenza artificiale sempre più pervasivi pone interrogativi e criticità a livello etico e giuridico.

“La comunità europea dell’intelligenza artificiale in campo contro il Covid-19”, “Intelligenza artificiale per combattere e prevenire le pandemie”, “Intelligenza artificiale per tracciare gli asintomatici”, “L’intelligenza artificiale rivoluzionerà l’apprendimento nel prossimo decennio?”, “Intelligenza artificiale e giustizia, verso un giudice robot”, “L’intelligenza artificiale a sostegno delle donne vittime della violenza in casa”. Questi sono solo alcuni dei titoli apparsi online nei mesi scorsi, a mostrarci quanto l’uso dell’intelligenza artificiale sia diffuso in ogni settore della vita quotidiana, dalla gestione delle emergenze alle situazioni ordinarie.

Ma cosa significa intelligenza artificiale? Quando possiamo definire una macchina intelligente?

Nel 1950 fu pubblicato l’articolo di Alan Turing “Computing Machinery and Intelligence” sulla rivista *Mind*, in cui lo scienziato britannico introduceva il suo famoso test: una macchina poteva essere considerata intelligente quando il suo comportamento – osservato da un essere umano – fosse indistinguibile da quello di una persona. Ancora non si parlava, tuttavia, di intelligenza artificiale; l’espressione sarebbe stata coniata nel 1956 dal matematico John McCarthy. Da allora, le riflessioni sull’idea di un sistema artificiale che possa replicare l’intelligenza umana affascinano scienziati, filosofi e giuristi.

**Arianna Neri,**  
avvocato, Teaching  
Staff Member European  
Health Law and  
Technology, Università  
di Pisa

Dalla seconda metà degli anni '50 del Novecento, iniziava un periodo di rapidi progressi e sembrava quasi inevitabile la creazione di macchine dall’intelligenza simile a quella umana. Tuttavia i primi entusiasmi non durarono a lungo, e il processo si rivelò più lento del previsto. A

partire dagli anni '80, le ricerche si frammentarono su singoli aspetti del problema, quali per esem-



La statua di Alan Turing a Bletchley Park. In alto, foto di Turing (© Ian Peticrew-Wikimedia).

pio il riconoscimento vocale e la visione artificiale.

Se fino a quel momento ci si era mossi con un approccio *top-down*, nel tentativo di sviluppare un modello unitario di intelligenza artificiale, negli anni 2000 si abbandona l'idea di replicare l'intelligenza umana e si inizia a ragionare – con una logica *bottom-up* – sul tentativo di risolvere specifici problemi. Nasce così una nuova generazione di macchine intelligenti, alimentate da un numero ristretto di algoritmi ma da un enorme numero di dati. Inizia l'era dell'intelligenza artificiale basata sui dati e sull'apprendimento automatico (il cosiddetto *machine learning*), con un linguaggio non più ap-

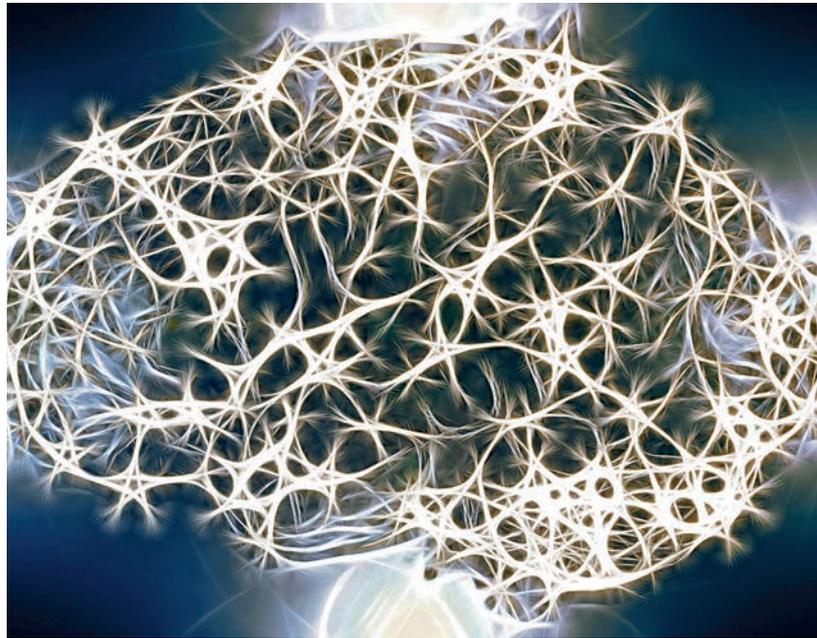
partenente alla logica ma alla statistica. Sebbene i meccanismi alla base della maggior parte dei sistemi di intelligenza artificiale siano quindi essenzialmente statistici, in quanto alimentati da moltissimi dati, il risultato ci appare come un comportamento adattativo che interpretiamo come "intelligente".

**Negli anni 2000 inizia l'era dell'intelligenza artificiale basata sull'apprendimento automatico.**

Una variante di questo sistema basato sui dati è il *deep learning*, che sfrutta reti neurali più complesse. Attualmente le reti neurali sembrano la tecnica migliore per risolvere alcuni problemi percettivi complessi. Rinunciando a creare un sistema che imiti complessivamente l'intelligenza umana, si è così comunque giunti a imitare determinati meccanismi del nostro cervello.

### Umano e artificiale

Come si sa, il cervello è composto da cellule, che comunicano tra loro scambiandosi messaggi chimici attraverso un liquido detto extracellulare. I neuroni – le cellule tipiche del sistema nervoso – hanno un corpo centrale (con un diametro dell'ordine dei milionesimi di metro) e molte ra-



Rappresentazione grafica della rete neuronale che costituisce il nostro cervello.

mificazioni che, al microscopio, appaiono dense di "bottoni": si tratta dei punti in cui un ramo viene in contatto con altri rami di neuroni adiacenti, attraverso uno spazio chiamato *sinaptico*.

Tentiamo di comprendere il meccanismo di un circuito neurale biologico, prendendo come punto di partenza un circuito ultra-semplificato, composto soltanto da due neuroni, che chiameremo "S" per sensitivo e "M" per motorio. Operiamo un'ulteriore semplificazione riducendo i rami di ciascun neurone a due. Il neurone S avrà quindi un ramo diretto verso l'esterno dell'organismo, con la funzione di ricevere uno stimolo, per esempio una pressione meccanica sulla cute. Un recettore disposto all'estremità cutanea di S trasduce lo stimolo in segnale elettrico. Il potenziale elettrico prodotto da S è condotto lungo tutto il neurone fino all'estremità dell'altro ramo di S, che è in contatto sinaptico con il secondo neurone M. Il segnale passa attraverso lo spazio sinaptico con una modalità basata sul rilascio di sostanze chimiche, chiamate neurotrasmettitori. Il segnale elettrico, rigenerato nel secondo neurone M, percorre tutta la cellula M fino a raggiungere il muscolo, che di conseguenza si contrae. Questo schema descrive (seppur in modo molto semplificato) il ruolo del sistema nervoso nel mediare una risposta motoria a stimoli esterni, tipica di animali filogeneticamente "antichi".

La relazione tra stimolo e risposta è modulabile, nel senso che la sinapsi non è un semplice interrut-

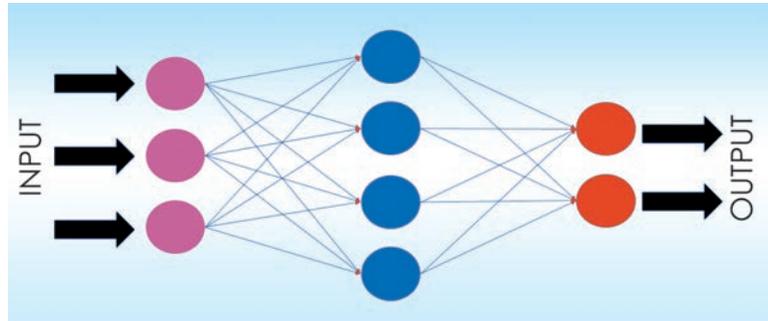
tore *on-off*, ma può modificare la probabilità che il segnale prodotto da S sia efficace nell'attivare M. Anche un circuito così semplice è infatti plastico: la probabilità che lo stimolo provochi una certa risposta si modifica in base all'esperienza. Ciascuna attivazione del circuito modifica l'efficienza della sinapsi nel passare il segnale da un neurone all'altro. Un circuito di un individuo filogeneticamente antico come un insetto o una lucertola ha milioni o miliardi di neuroni, ciascuno con decine di migliaia di connessioni. Nell'insieme, si avrà una rete neurale con un numero incredibile di potenziali connessioni. Nel cervello umano, il numero di neuroni è circa  $10^{11}$ , con  $10^{13}$ - $10^{15}$  sinapsi.

**Le reti neurali artificiali sono costituite da nodi, che rappresentano l'equivalente hardware di un neurone.**

Le reti neurali artificiali sono costituite da nodi, che rappresentano l'equivalente *hardware* di un neurone. Ciascun nodo comunica con altri nodi, a formare appunto una rete. La probabilità o intensità del passaggio del segnale digitale

tra un nodo e l'altro può variare autonomamente in base al tipo di output. Le reti, quindi, riproducono parzialmente la complessità delle strutture neurali, non soltanto presentando una miriade di possibili connessioni, ma anche riproducendo la possibilità di modulare l'efficacia di ciascuna connessione in base all'esperienza (intendendo per esperienza la ripetizione della procedura  $\text{input} > \text{output}$ ).

Analogamente al circuito neurale biologico, la rete neurale artificiale si configura come una realtà dinamica, che interagisce con lo stimolo esterno, cambiando la propria struttura in risposta ad esso. Immaginiamo, per esempio, uno stimolo esterno luminoso – tre luci di colori giallo, rosso e verde – che viene trasdotto da una telecamera in un segnale digitale. Anche l'output sarà costituito da tre valori numerici che rappresentino i tre colori. Supponiamo che la rete sia costruita per riconoscere il rosso. La rete darà inizialmente risposte a caso al presentarsi dei vari colori. Quando, per caso, il rosso darà come output "rosso", le connessioni tra nodi che hanno prodotto questo risultato casuale



La rete neurale artificiale è composta da tre strati: uno strato di ingresso, uno strato nascosto e uno di uscita.

saranno "rafforzate". Con successive interazioni, la rete darà come output "rosso" soltanto in risposta a "rosso" come input. Nella nostra descrizione semplificata, la rete imparerà quindi a riconoscere il rosso. In sostanza, la rete neurale simula la malleabilità delle sinapsi del sistema nervoso, che imparano grazie all'esperienza. È il meccanismo dell'autoapprendimento di cui molto si parla con riferimento alle reti neurali artificiali.

Il parallelo con l'intelligenza umana è certamente suggestivo, ma forse non sufficiente per analizzare in maniera adeguata gli innumerevoli profili di criticità che lo sviluppo dell'intelligenza artificiale pone. La possibilità che ci sia un autoapprendimento, con conseguente autonoma modifica dei circuiti, introduce infatti un elemento di imprevedibilità e rende oscuri i meccanismi decisionali. Non a caso si parla di scatole nere, che, secondo la definizione dell'Alan Turing Institute, vanno intese come «qualsiasi sistema di intelligenza artificiale i cui meccanismi e la cui logica interna siano opachi o inaccessibili alla comprensione umana».

### Interrogativi etici e giuridici

I sistemi di intelligenza artificiale, allo stato attuale, sembrano avere alcune caratteristiche: si possono basare su reti neurali, che simulano i circuiti neurali biologici; in generale utilizzano enormi quantità di dati; sfruttano meccanismi di autoapprendimento; c'è interazione del sistema con l'ambiente o con altri sistemi; c'è una certa imprevedibilità e inspiegabilità del risultato. Se coniughiamo queste caratteristiche con una diffusione dei sistemi di intelligenza artificiale e robotica in molteplici settori della vita quotidiana, è facile vedere come gli interrogativi sia etici che giuridici non siano pochi: le modalità di raccolta e gestione dei dati personali, la sostituzione del lavoro

ro umano con robot, la responsabilità per danni provocati da sistemi di intelligenza artificiale, il rischio di decisioni discriminatorie adottate da algoritmi, i possibili danni psicologici legati all'interazione uomo-macchina, gli eventuali impatti ambientali.

In questo contesto, le istituzioni europee si sono fatte promotrici di un approccio prudente, coerentemente con la *policy* dell'Unione Europea della cosiddetta *responsible research and innovation* (RRI) [1].

Il presupposto da cui si parte è che l'intelligenza artificiale è una sfida importante, anche dal punto di vista economico, da cui può dipendere il miglioramento delle condizioni di vita in molti settori (basta pensare a quello medico); tuttavia è necessario evitare uno sviluppo privo di qualsiasi regola, che ne vanificherebbe i benefici e potrebbe provocare pregiudizi importanti presso i singoli e la collettività.

La Commissione Europea ha così emanato nel 2018 una comunicazione contenente un *Piano coordinato sull'intelligenza artificiale*. Nell'ambito di tale strategia, è stato nominato un gruppo di esperti, che nell'aprile 2019 ha pubblicato le linee guida etiche per un'intelligenza artificiale affidabile (*Ethics Guidelines for Trustworthy AI*). Vengono indicati 7 principi guida per lo sviluppo e l'utilizzo di sistemi di intelligenza artificiale: *human agency* e *oversight*, assicurando il rispetto dell'autonomia umana e una possibilità di intervento in ogni fase di operatività del sistema; robustezza tecnica e sicurezza; gestione corretta dei dati; trasparenza riguardo a tutti gli elementi rilevanti per un sistema di IA (i dati, il sistema e il modello di business); diversità, inclusione, non discriminazione e correttezza; benessere sociale e ambientale (anche l'ambiente deve essere considerato uno *stakeholder* nel ciclo di vita dell'intelligenza artificiale); responsabilità (o più precisamente *accountability*).

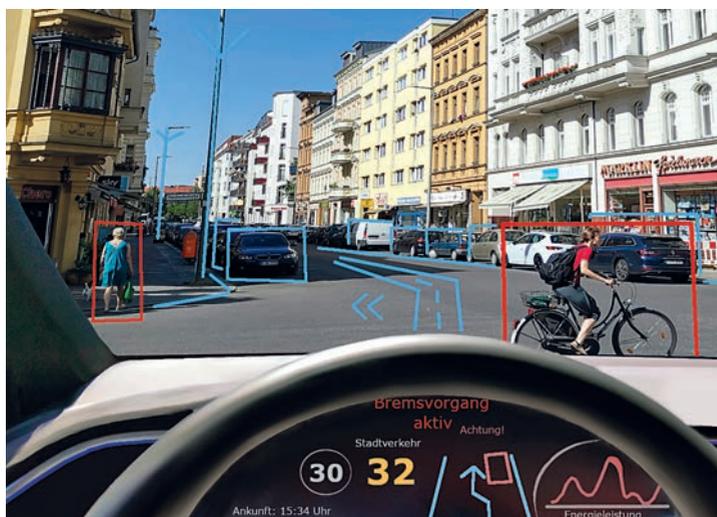
A livello italiano, è stato emanato nel 2020 il documento *Proposte per una strategia italiana per l'intelligenza artificiale*. Nel ribadire l'importanza degli aspetti etici in tutto il ciclo di vita di un sistema di intelligenza artificiale (*ethical by design*), il report italiano enfatizza quanto già messo in evidenza a livello europeo, vale a dire l'importanza di un approccio che si basi sull'affidabilità dei sistemi: l'allineamento ai valori etici deve includere, quindi, un livello adeguato di sicurezza, non solo individuale ma estesa pure a profili micro

e macro economici, occupazionali, di sicurezza sociale e ambientale. In questo contesto, i principi etici da rispettare dovrebbero essere definiti non solo da giuristi e filosofi, ma anche economisti, ingegneri e tecnici, considerando che gli aspetti tecnologici sono fortemente intrecciati con quelli economici, sociali e giuridici.

### Chi paga per i danni provocati da un sistema di intelligenza artificiale?

Uno degli aspetti che dal punto di vista giuridico e sociale pone maggiori perplessità è quello della responsabilità. Chi risponde dei danni provocati da un sistema di intelligenza artificiale? Gli esempi potrebbero essere innumerevoli: si pensi a un incidente provocato da una vettura a guida autonoma, o da un robot chirurgico, o a una diagnosi medica errata effettuata da un sistema di intelligenza artificiale. Se si enfatizza il profilo della similitudine intelligenza umana-intelligenza artificiale e ci si focalizza esclusivamente sui profili di autonomia, dovremmo immaginare (come da alcune parti è stato suggerito) di attribuire una sorta di personalità giuridica ai robot, al fine di renderli soggetti responsabili. È ovvio che si tratterebbe di una risposta solo apparente, dal momento che bisognerebbe individuare sempre un soggetto in grado di rispondere economicamente dei danni, fornendo una sorta di fondo patrimoniale ai robot (come accade per le società).

Inoltre, le caratteristiche di opacità e complessità dei sistemi di intelligenza artificiale possono rendere molto difficile comprendere in quale fase del ciclo



Cosa succede se un'automobile a guida autonoma fa un incidente? (© Eschenzweig- Wikimedia).

## Chi risponde dei danni provocati da un sistema di intelligenza artificiale?

di un robot chirurgico basato su un sistema di intelligenza artificiale. L'errore potrebbe essere del progettista, del produttore, ma anche del personale sanitario che non ha inserito adeguatamente i dati, o che non è stato in grado di intervenire laddove era possibile passare a un intervento di tipo manuale, o ancora potrebbe essere dell'ospedale che non ha adeguatamente formato il personale.

Uno dei documenti redatti recentemente a livello europeo (*Liability for Artificial Intelligence and other emerging digital technologies*, 2019) ha introdotto la nozione di "operatore" quale soggetto che è nella migliore posizione per attuare un controllo della tecnologia e che usufruisce del maggior beneficio dalla tecnologia; in tal modo si garantisce una flessibilità che consente di tener conto della peculiarità della tecnologia nelle situazioni concrete.

Nel febbraio 2020, la Commissione Europea ha indirizzato al Parlamento Europeo, al Consiglio Europeo e al Comitato Economico e Sociale il *Report on the Safety and Liability implications of Artificial Intelligence, the Internet of Things and robotics* [2], in cui si mette in rilievo la necessità di garantire un livello di tutela alle vittime da danni da tecnologie digitali analogo a quello delle vittime da tecnologie tradizionali, tenendo conto in particolare della complessità dei sistemi di intelligenza artificiale, della loro opacità, autonomia e dipendenza dai dati. Nel contesto attuale – rileva la Commissione – alcune vittime potrebbero rischiare di rimanere senza tutela, oltre al fatto che l'allocatione dei costi derivante dall'attuale normativa potrebbe rivelarsi inefficiente [3].

Il tema della responsabilità è centrale, poiché il rischio che le vittime di un sistema di intelligenza artificiale rimangano prive di tutela o che vi sia un'allocatione dei rischi non adeguata potrebbe vanificare i benefici che vengono solitamente invocati quando si parla di intelligenza artificiale.

In questo contesto, a ogni operatore del settore si richiede di fare uno sforzo di trasparenza in ogni fase e di operare in modo tale da rendere quanto più possibile spiegabili le decisioni alla base di un determinato algoritmo, le istruzioni fornite, i dati

di vita della tecnologia si collochi il difetto o l'errore e quindi individuare il soggetto che debba rispondere del pregiudizio. Si pensi, ad esempio, al danno provocato

immessi e così via, pur nella consapevolezza di un margine di incertezza non eliminabile.

### Conclusioni

Le riflessioni sulle similitudini tra l'intelligenza umana e quella artificiale – sia pure suggestive e di particolare interesse per comprendere alcuni meccanismi dei sistemi di intelligenza artificiale – non sempre si rivelano quindi utili per comprendere e risolvere le reali criticità che questi sistemi possono implicare.

È auspicabile un approccio *bottom-up*: anziché parlare di intelligenza artificiale sarebbe cioè probabilmente più corretto parlare di "intelligenze artificiali", evidenziando il fatto che non si è di fronte a un unico meccanismo che replica l'intelligenza umana, bensì a strumenti nati per risolvere determinati problemi in contesti differenti, con soluzioni non uniformi e rischi diversificati. L'approccio antropocentrico promosso dal recente report italiano invita a una visione dell'intelligenza artificiale sempre complementare, funzionale all'intelligenza umana (la cosiddetta "AI for good"), e invita all'adozione di forme di governo delle tecnologie emergenti in questo settore. L'intelligenza artificiale non sostituirà – almeno allo stato attuale – l'intelligenza umana, ma il diffondersi di una tecnologia così pervasiva in assenza di regole potrebbe certamente arrecare un notevole pregiudizio a singoli individui e alla collettività. Al tempo stesso, è bene rammentare che un approccio antropocentrico non può prescindere da un processo di educazione e alfabetizzazione digitale delle persone, che dovranno essere adeguatamente preparate a interagire con i sistemi di intelligenza artificiale, per evitare che ne siano in qualche modo sopraffatte.

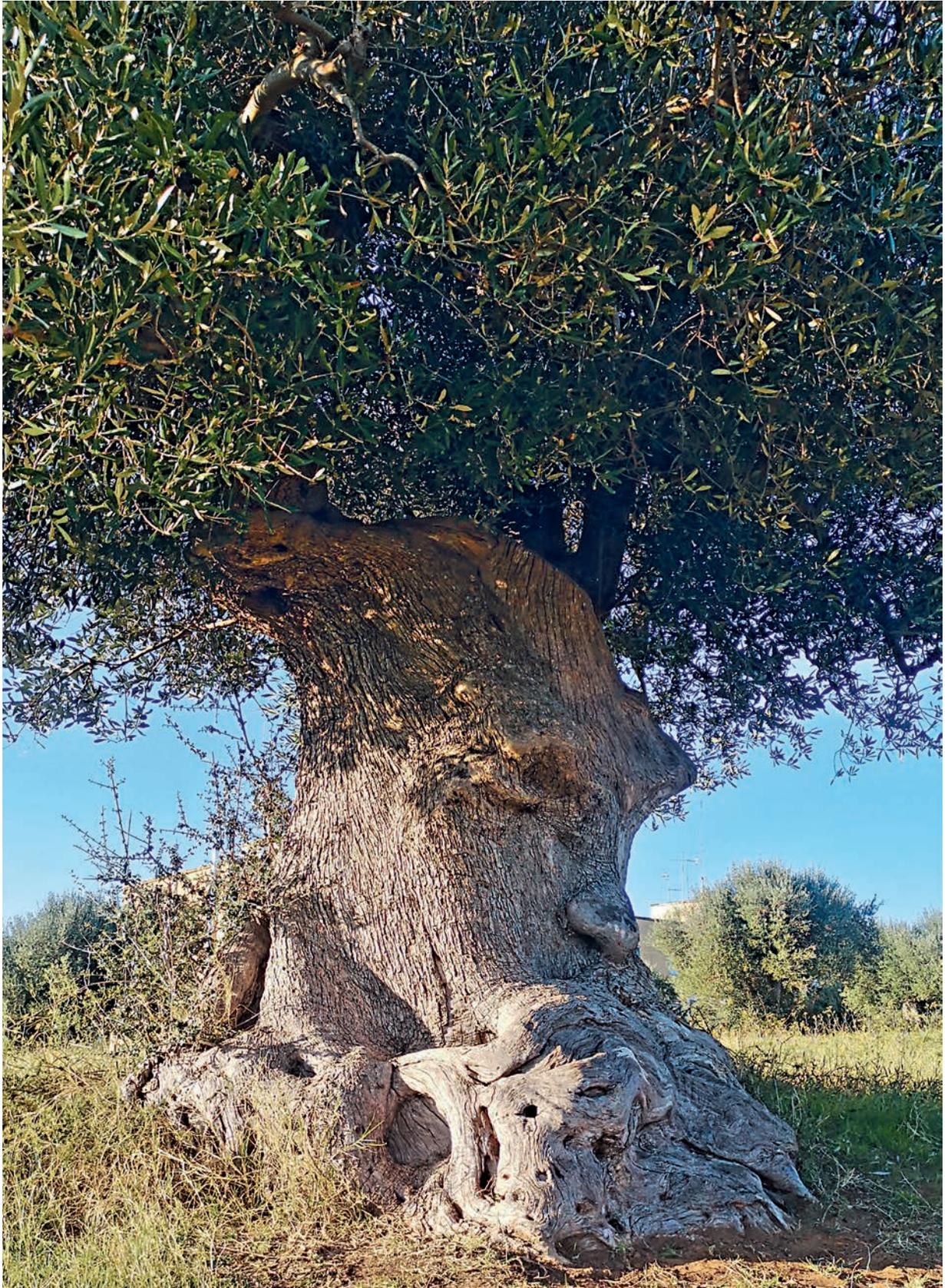


### Ringraziamenti

Si ringrazia per la preziosa consulenza e il supporto nella redazione dell'articolo il prof. Francesco Orzi, professore ordinario di Neurologia, Sapienza Università di Roma.

### Riferimenti bibliografici

- [1] COMMISSIONE EUROPEA, *L'intelligenza artificiale per l'Europa*, Bruxelles 25 aprile 2018.
- [2] COMMISSIONE EUROPEA, *Report on the Safety and Liability implications of Artificial Intelligence, the Internet of Things and robotics*, Bruxelles 2020.
- [3] Su questo argomento si veda anche COMMISSIONE EUROPEA, *Libro bianco sull'intelligenza artificiale - Un approccio europeo all'eccellenza e alla fiducia*, Bruxelles 2020.



Ulivo pensante

Fotografia di Stefano Fontana

# Dar voce alle piante: il bioristor e il futuro dell'agricoltura

Oggi è possibile comunicare con le piante per carpire i loro bisogni: un sensore innovativo inserito direttamente nello stelo permette di monitorare in vivo e in modo continuo il loro stato fisiologico.

Il comparto agricolo mondiale è messo seriamente in difficoltà dalla necessità di garantire sufficiente approvvigionamento di cibo a una popolazione in continua crescita e che secondo la FAO (Food and Agriculture Organization delle Nazioni Unite) raggiungerà i 9,6 miliardi nel 2050.

Al fine di garantire la sicurezza alimentare, le produzioni agricole dovranno aumentare del 16% a fronte però di una ridotta superficie coltivabile, della scarsa disponibilità di risorse idriche e dell'impatto che i cambiamenti climatici hanno e avranno sulle produzioni. Oggi l'agricoltura consuma mediamente il 70% di tutti i prelievi idrici e la FAO stima che entro il 2030 questi prelievi per l'irrigazione aumenteranno di circa il 14% [1].

L'impatto negativo dei cambiamenti climatici sul comparto agricolo internazionale è allarmante, soprattutto nei Paesi del Sud Europa, dove nel

**L'impatto negativo dei cambiamenti climatici sul comparto agricolo internazionale è allarmante, soprattutto nei Paesi del Sud Europa.**

giro di trent'anni la produzione di coltivazioni non irrigue – come grano, mais, barbabietole da zucchero – potrebbe diminuire del 50% e conseguentemente ridurre il valore commerciale dei terreni dell'80% entro il prossimo

**Filippo Vurro,**  
chimico, e  
**Michela Janni,**  
agronoma e  
biotecnologa vegetale,  
Istituto IMEM-CNR,  
Parma

secolo. Come conseguenza dei cambiamenti climatici, infatti, le temperature sono in aumento, l'andamento delle precipitazioni sta variando, ghiaccio e neve si stanno sciogliendo e il livello del mare si sta innalzando; gli eventi meteorologici e climatici estremi quali inondazioni e siccità diventeranno più frequenti e intensi in molte regioni. L'ultimo rapporto dell'Agenzia Europea per l'Ambiente stima che i Paesi europei che subiranno un impatto maggiore dai cambiamenti climatici sono Italia, Grecia, Spagna e Portogallo, oltre che nazioni finora beneficate da un clima continentale quali Francia, Austria e Romania.

Sono stati proposti numerosi approcci al fine di alleviare l'impatto dei cambiamenti climatici in agricoltura. Tra questi, la Climate-Smart Agriculture (CSA) è un approccio promosso dalla FAO, a partire dal 2010, volto a trasformare e riorganizzare le attività agricole al fine di garantire uno sviluppo e una sicurezza alimentare resilienti al cambiamento climatico, rispettando le peculiarità economiche e culturali dei mercati locali. La CSA si fonda su tre pilastri: aumentare la produzione agricola e il profitto, sviluppare un adattamento progressivo al cambiamento climatico e, dove possibile, ridurre o eliminare le emissioni di gas serra.

Diventa prioritario, quindi, sviluppare nuovi approcci per razionalizzare e aumentare l'efficienza del consumo idrico in agricoltura. L'innovazione e l'Agri-Tech rappresentano le forze



Un uso appropriato dei sistemi di irrigazione è fondamentale in agricoltura: il pomodoro è considerato un modello di studio ottimale.

**Negli ultimi tre anni il 22% delle aziende agricole italiane ha investito in strumenti di agricoltura di precisione.**

dell'ambiente. L'agricoltura di precisione è una strategia di gestione aziendale che impiega strumenti e tecnologie per acquisire e trasmettere dati che portino a decisioni finalizzate alla produzione agricola per fare "la cosa giusta, nel posto giusto, al momento giusto".

L'osservatorio Smart Agrifood della School of Management del Politecnico di Milano e del laboratorio RISE dell'Università degli Studi di Brescia ha recentemente reso noto che negli ultimi tre anni il 22% delle aziende agricole italiane ha investito in strumenti di agricoltura di precisione. L'attenzione delle aziende si è rivolta verso macchine operatrici a dosaggio variabile, trattatrici con guida assistita, software specializzati, centraline meteo, mappe e sensori, sistemi di raccolta, integrazione e analisi delle informazioni o Big Data; la propensione all'investimento è maggiore nelle aziende del Nord Italia che operano nei settori dell'allevamento, nel

trainanti dell'agricoltura 4.0 che punta a introdurre nelle aziende agricole strumenti tecnologici e di precisione, per renderle sempre più competitive e rispettose

te la maggior parte dei sensori oggi utilizzati nell'agricoltura di precisione si basa su metodi di misura indiretta che utilizzano prevalentemente misurazioni effettuate in prossimità della pianta (prossimali), o misurazioni effettuate in remoto, tramite satelliti, droni, aerei.

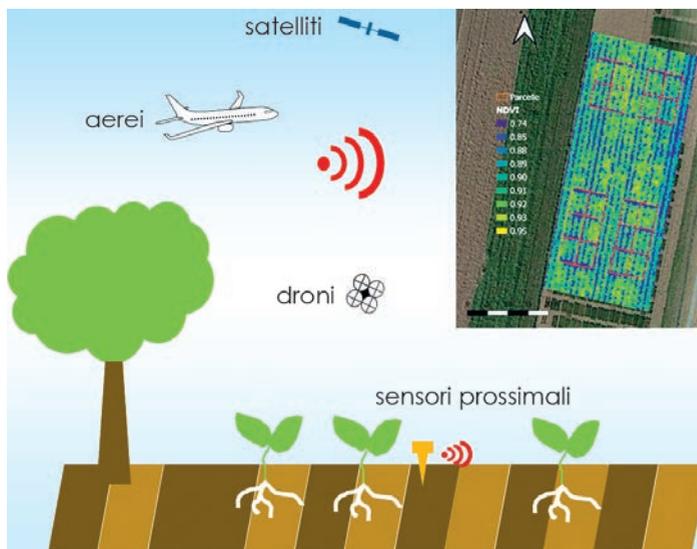
La necessità di sviluppare nuovi strumenti in grado di dare indicazioni circa il reale stato di salute della pianta e le sue esigenze è prioritaria per un'agricoltura sostenibile nel nostro Paese: occorrono strumenti che siano a basso costo, di facile utilizzo e consentano l'ottimizzazione dell'uso delle risorse idriche.

Un approccio efficace per verificare il reale stato di salute della pianta è monitorarne la linfa.

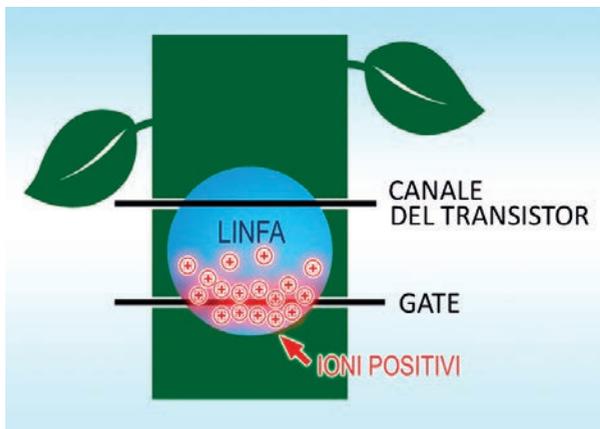
settore cerealicolo e nelle colture industriali con una classe di fatturato superiore a 50 000 euro e un organico composto da giovani lavoratori di età compresa tra i 18 e i 35 anni [2].

**Interrogare le piante**

I sensori sono un importante supporto per le realtà agricole, perché consentono di ottenere informazioni sullo stato di salute delle piante e sulle sue condizioni generali. Sfortunatamente



Principali sensori prossimali e remoti impiegati nell'agricoltura di precisione. Nella foto laterale, un campo ripreso con una camera termica da un drone.



Il bioristor e le sue componenti.

La linfa è un liquido trasportato nei vasi cribrosi, attraverso cui ha luogo il trasferimento delle sostanze necessarie alla sopravvivenza della pianta. Questi vasi, sia xilematici che floematici, hanno un contenuto altamente variabile in funzione delle condizioni in cui si trova la pianta, ovvero del suo stato fisiologico.

Nel gruppo di ricerca dell'IMEM-CNR (Istituto dei Materiali per l'Elettronica e il Magnetismo) abbiamo sviluppato un sensore, basato su un transistor elettrochimico organico, che viene inserito nel fusto delle piante per monitorare in modo continuo e in tempo reale la composizione della linfa [3].

Il sensore è costituito da due fibre altamente biocompatibili. La prima costituisce il canale principale del transistor realizzato ricoprendo (in termini un po' più chimici si dice "funzionalizzando") una fibra in cotone, in seta o sintetica con uno strato sottilissimo (anche solo 100 nm) di polimero conduttore, un materiale plastico che si lascia attraversare dagli elettroni.

La fibra funzionalizzata mantiene le sue caratteristiche meccaniche e quindi può essere lavorata come un qualsiasi filato tessile, ma, grazie al polimero, diventa un buon conduttore elettrico; le fibre tessili, invece, sono degli isolanti elettrici. Il polimero usato per ricoprire la fibra ha inoltre la capacità di assorbire ioni positivi dal liquido con il quale viene a contatto, se questi sono "spinti" nel polimero da un opportuno campo elettrico. È necessario realizzare dunque un altro elettrodo che, sottoposto a un oppor-

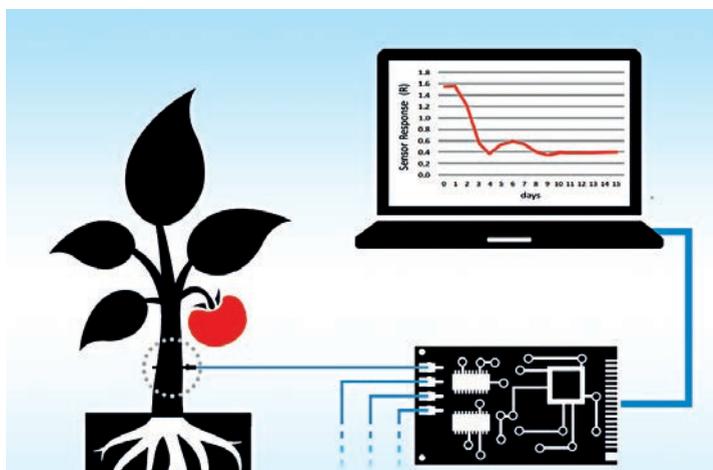
tuno potenziale, genera il campo elettrico che a sua volta spinge nel polimero depositato sul filo principale gli ioni presenti nel liquido. Questo secondo elettrodo, il "gate", è anch'esso costituito da un filo simile al primo, realizzato su fibra tessile ricoperta con il medesimo polimero organico. Applicando un potenziale elettrico al gate, il sensore si accende e interagisce con la linfa delle piante, leggendone i cambiamenti e il contenuto in ioni.

### Il telegrafo delle piante

Gli esperimenti condotti in vivo nelle piante hanno mostrato che il sistema è completamente biocompatibile poiché il dispositivo è essenzialmente realizzato con fibre vegetali, che la pianta non riconosce come corpo estraneo.

Questo sensore può essere impiegato per "spiare" cosa accade nella pianta e consentire alla pianta stessa di comunicare con l'agricoltore in modo da trasmettergli i suoi fabbisogni. Il dispositivo è un componente elettronico come un transistor, ma allo stesso tempo ci parla dello stato fisiologico della pianta: per questo lo abbiamo chiamato "bioristor".

**Il bioristor consente alla pianta di comunicare con l'agricoltore per trasmettergli i suoi fabbisogni.**



Schema generale del sistema di acquisizione dei dati dal bioristor: una scheda analogica trasforma il segnale del bioristor da analogico a digitale e il segnale viene inviato a un PC per l'analisi della risposta del sensore nel tempo.

Il segnale del bioristor viene letto tramite una scheda elettronica e inviato a un computer sul quale è possibile seguire in tempo reale le variazioni di composizione della linfa, e quindi le variazioni dello stato fisiologico associate allo stato di salute della pianta. Il bioristor è stato integrato in vivo con successo in piante di pomodoro, soia, vite, pero, kiwi, frumento e canna comune.

Il pomodoro è considerata una pianta modello di importanza eccezionale, soprattutto in considerazione delle notevoli conoscenze disponibili sui suoi aspetti genetici, fisiologici, biochimici e agronomici, molte delle quali trasferibili ad altre colture. Il pomodoro, inoltre, richiede un elevato consumo idrico, tant'è vero che, per la produzione di un singolo pomodoro, la FAO stima un consumo di acqua pari a 13 litri. Per queste ragioni, il pomodoro è la specie sulla quale al momento è stata condotta la maggior parte degli esperimenti con il bioristor.

In condizioni di coltivazione standard e di regolare idratazione, il bioristor mostra un segnale oscillante, del periodo di 24 ore, con un incremento di notte e un decremento di giorno che è dovuto al ritmo circadiano della pianta e che segue l'alternanza tra fotosintesi e traspirazione.

Quando l'innaffiamento delle piante di pomodoro viene interrotto, dopo circa 30 ore, si osserva un deciso calo della risposta del bioristor, dimostrando che può essere usato come strumento per rilevare precocemente che la pianta sta subendo uno stress idrico e deve essere, quindi, prontamente innaffiata [4].

Anche le prove effettuate presso il PhenoLab dell'ALSIA in Basilicata, dove i dati ottenuti con il bioristor sono stati combinati con quelli ottenuti mediante altre tecniche di caratterizzazione digitale delle piante (fenotipizzazione), hanno confermato che il segnale del bioristor si correla con la biomassa delle piante e con la loro traspirazione, ed è quindi un ottimo indicatore del fabbisogno di acqua. Grazie al sostegno di ALSIA, il bioristor si propone come nuovo strumento per la fenotipizzazione delle piante.

### La sfida in campo

La più grande sfida a cui è stato sottoposto il bioristor è stata una prova in campo presso l'azienda



Applicazione del bioristor per ottenere un risparmio idrico.

Stuard di Parma avvenuta nella stagione 2018-2019, in collaborazione con Mutti, azienda emiliana leader nei prodotti a base di pomodori, che ha scommesso sul progetto dell'IMEM [5].

In questa prova tre campi di pomodoro sottoposti a diversi regimi di irrigazione sono stati monitorati per circa 60 giorni. Il bioristor ha registrato con successo, per un lungo periodo di tempo, i dati fisiologici della linfa in tutti i regimi di irrigazione, producendo informazioni cruciali per determinare la quantità ottimale di acqua fornita.

Da questi dati abbiamo stimato che l'uso del bioristor durante l'intera stagione avrebbe potuto far risparmiare il 40% di acqua irrigua a parità di produzione quantitativa e qualitativa del prodotto. Il bioristor appare, quindi, un promettente dispositivo SMART in grado effettivamente di comunicare i reali bisogni della pianta in tempo reale al fine di aiutare l'agricoltore a irrigare quanto e quando serve, gettando così le basi per una comunicazione immediata tra il mondo vegetale e l'uomo.

### Riferimenti bibliografici

- [1] FAO, *Coping with climate change: the roles of genetic resources for food and agriculture*, Roma 2015.
- [2] EEA, *Climate change adaptation in the agriculture sector in Europe*, Publications Office of the European Union, Luxembourg 2019.
- [3] N. COPPEDÈ, M. JANNI *et al.*, "An in vivo biosensing, biomimetic electrochemical transistor with applications in plant science and precision farming", *Scientific Reports*, 7, 1, 2017.
- [4] M. JANNI *et al.*, "In Vivo Phenotyping for the Early Detection of Drought Stress in Tomato", *Plant Phenomics*, 2019.
- [5] V. GUALERZI, "Acqua, istruzioni per l'uso", *National Geographic Italia*, luglio 2018.

# Cento anni di polimerizzazioni: la rivoluzione di Hermann Staudinger

Un secolo fa un articolo di Hermann Staudinger poneva il primo mattone della moderna scienza dei polimeri.

È nell'articolo *Über Polymerisation* (Sulla polimerizzazione), arrivato il 13 marzo 1920 alla redazione del *Berichten der Deutschen Chemischen Gesellschaft* e stranamente mai tradotto, che Hermann Staudinger ha proposto l'uso del termine *polimerizzazione* per indicare i casi in cui «piccole unità individuali si combinano a formarne di più grandi mediante normali legami covalenti». Un concetto che tutti gli studenti ora imparano senza traumi, ma che, un secolo fa, produsse uno scompiglio incredibile, poiché molti scienziati non riuscivano neppure a immaginare l'esistenza di molecole così lunghe e pesanti.

**Eleonora Polo,**  
chimica, ISOF-CNR

le molecole che possono addizionare idrogeno, cloro o acqua – noi ora li definiamo *composti insaturi* – possono anche addizionare sé stesse. Tre anni dopo pubblicò un articolo sulla polimerizzazione di etene, propene, pentene e pinene, ma non aveva idea di quale fosse la struttura del prodotto finale.

## Aggregati di molecole o molecolone?

Noi ora definiamo un *polimero* (= molte parti) un insieme di *macromolecole* (= molecole giganti) costituite da tanti mattoncini (*unità ripetitive*) che possono essere tutti uguali (*omopolimero*) o di due o più tipi (*copolimero*). Anche il termine *Makromolekel* è stato coniato da Staudinger nel 1922.

In realtà, il termine polimero era stato inventato nel 1833 da Jöns Jacob Berzelius per indicare una sostanza la cui formula empirica era il multiplo intero di un'altra: il benzene ( $C_6H_6$ ) diventava un polimero dell'acetilene ( $C_2H_2$ ), anche se è come confrontare una mela con un carciofo.

Trent'anni dopo, Marcellin Berthelot conìò il termine *polimerizzazione* affermando che tutte



Hermann Staudinger, uno dei padri della scienza dei polimeri (© Fr. Schmelhaus/ETH Zürich- Wikimedia).





Staudinger nel suo laboratorio di Chimica organica all'ETH di Zurigo, nel 1916 (© ETH-Bibliothek Zürich/Bildarchiv).

In breve tempo si guadagnò un posto di rilievo fra i chimici organici grazie agli studi su varie classi di molecole (cheteni, nitreni, diazocomposti alifatici, nitroni, piretrine ed esplosivi) e su nuovi composti del fosforo, che lo portarono a scoprire la reazione che porta il suo nome. Cominciò poi a interessarsi alla chimica delle macromolecole naturali e, per studiarne in modo sistematico le caratteristiche e la reattività, preparò anche vari polimeri sintetici ad alto peso molecolare. La sua sintesi dell'isoprene da prodotti naturali come il limonene risultò così efficiente che i suoi brevetti furono utilizzati dall'azienda chimica BASF durante la guerra per produrre la gomma sintetica. Nel Primo conflitto mondiale, contribuì alla sintesi degli aromi artificiali – impiegati per sostituire pepe e caffè che non

**Staudinger si è dovuto confrontare con la storia, che ha fatto irruzione nella sua vita personale e nella sua ricerca.**

arrivavano più in Germania – e di farmaci come atropina e anestetici, ma non volle lavorare a nessun titolo sulle armi chimiche, in aperto contrasto con l'ex-collega Fritz Haber che

invece collaborò attivamente allo sviluppo dei gas tossici prima e dopo la guerra. Nonostante varie offerte di cattedre in Austria e Germania, nel periodo compreso fra il 1912 e il 1926 preferì rimanere in Svizzera, la cui neutralità gli permetteva di esprimere apertamente le

sue opinioni contrarie al conflitto, cosa impossibile e “poco salutare” nella madrepatria. Immune all'euforia nazionalistica, già nel 1917 aveva previsto la sconfitta della Germania e scrisse più volte ai vertici militari tedeschi per sollecitare l'avvio di un negoziato di pace, perché con l'ingresso nel conflitto degli Stati Uniti il loro destino era chiaramente segnato. Non fu degnato di alcuna risposta, allo stesso modo dei famosi “Quattordici punti” contenuti nella proposta di pace del presidente americano Woodrow Wilson.

Sempre nel 1917, pubblicò sulla rivista della Croce Rossa a Ginevra un articolo in cui affermava che le capacità distruttive delle nuove armi tecno-

logiche rendevano la guerra fra nazioni non più praticabile ed era indispensabile trovare modalità pacifiche per risolvere le controversie. Una pace che finiva per trasformarsi in una specie di tregua fra due guerre era la cosa peggiore che potesse succedere all'Europa: purtroppo la storia gli ha dato tragicamente ragione. Staudinger ripubblicò nel 1947 una versione aggiornata dell'articolo che includeva anche l'energia atomica, ma di nuovo ebbe poca risonanza, probabilmente a causa della guerra fredda in atto.

### 1920-1932: la svolta e le lotte

Gli anni '20 furono per Hermann Staudinger un periodo particolarmente movimentato dal punto di vista professionale e personale. Il famoso articolo sulla polimerizzazione gli attirò critiche feroci da parte di quasi tutti i colleghi che cercarono in ogni modo di fargli cambiare idea. Era anche un momento delicato della sua vita personale, perché l'anno prima era morto suo padre e nel 1926, dopo vent'anni di matrimonio, aveva divorziato dalla prima moglie Dora Förster, da cui aveva avuto quattro figli. Forse per questo accettò la cattedra e la direzione del Chemisches Laboratorium dell'Università di Friburgo, dove rimase fino alla pensione.

Il ritorno in Germania non fu indolore perché dovette pagare lo scotto della sua presa di posizione durante la guerra: la sua correttezza politica fu messa in discussione da molti tedeschi e, prima di

offrirgli la cattedra, il Comitato di Facoltà pretese un chiarimento ufficiale sulla sua posizione nei confronti della Germania.

Arrivato a Friburgo, Staudinger si dedicò a tempo pieno alla chimica dei polimeri e divenne un instancabile e appassionato divulgatore delle sue teorie. Grazie alla lunga esperienza nella sintesi di molecole organiche, preparò in laboratorio molti nuovi polimeri e inventò metodi analitici innovativi per studiarli. Riuscì non soltanto a dimostrare che si tratta di vere molecole, ma elaborò anche il concetto di distribuzione dei pesi molecolari e individuò la natura del meccanismo a catena nella formazione dei polimeri per addizione. In molte occasioni si vide negare i fondi per l'acquisto di apparecchiature necessarie a confermare le sue teorie, eppure riuscì sempre a trovare vie alternative per dimostrare le sue ipotesi attraverso dati sperimentali verificabili.

La sua vita personale ebbe una svolta felice nel 1928 quando sposò Magda Voit, laureata in biochimica, con cui collaborò e pubblicò articoli sul ruolo delle macromolecole nei processi biologici e di cui riconobbe il contributo durante la cerimonia di conferimento del premio Nobel.

Dopo la sua morte, Magda Voit diventò presidente della Federazione internazionale che lotta per un maggiore riconoscimento del ruolo delle donne nella scienza e della Commissione scientifica tedesca dell'UNESCO, del cui programma *Biosfera* è stata la prima coordinatrice. Creò inoltre una fondazione per sostenere gli studenti di biologia, chimica e medicina in Lituania, il Paese in cui aveva conseguito la laurea e il dottorato.

### 1933-1945: la scienza non è neutrale

Negli anni '30 iniziò una nuova fase della vita di Hermann Staudinger, perché, dopo innumerevoli controversie e dibattiti roventi, la sua teoria sulla struttura macromolecolare dei polimeri cominciò finalmente a essere accettata dalla comunità scientifica.

Fu, tuttavia, una pace di breve durata, perché l'avvento del nazismo gli rese la vita sempre più difficile e il suo pacifismo, dichiarato pubblicamente con scritti e discorsi, gli procurò vessazioni di ogni genere da parte della Gestapo e di molti colleghi universitari che lo accusavano di atteggiamenti antitedeschi. Tutta la sua attività a Zurigo fu passata al setaccio dalla polizia segreta, che lo

interrogò più volte e l'obbligò a firmare una lettera di dimissioni in bianco per poterlo ricattare e impedirgli di opporsi apertamente al regime.

Il suo atteggiamento in quel periodo è comunque difficile da inquadrare, perché pubblicamente fece di tutto per far credere di essere a favore dei nazisti, ma nello stesso tempo le sue azioni furono spesso "politicamente scorrette", per esempio proteggendo studenti e assistenti invisibili al regime. Rifiutò un incarico importante all'Università di Berlino per non trovarsi troppo vicino al centro del potere. Per fugare ogni dubbio sulla sua lealtà tentò perfino di entrare nel partito nazista, ma la domanda fu rifiutata perché aveva fatto parte di una loggia massonica, seguendo le orme del padre che era stato Gran Maestro.

Nel 1934 rischiò anche di essere licenziato dal nuovo rettore dell'Università di Friburgo, il filosofo Martin Heidegger, iscritto al partito nazista. In altre occasioni andò vicino al pensionamento obbligatorio, ma fu sempre salvato dall'intervento di importanti esponenti delle industrie chimiche, che avevano bisogno di lui per la ricerca sulle gomme artificiali, indispensabili in tempo di guerra. Per un po' di tempo non poté

viaggiare e mantenere collaborazioni scientifiche all'estero, rischiando di rimanere tagliato fuori dal mondo scientifico internazionale. Le stesse limitazioni furono imposte anche ai suoi collaboratori.

Solo nel 1935 il regime allentò le restrizioni e gli concesse maggiore libertà di circolazione permettendogli di partecipare al Meeting della Faraday Society a Cambridge dove ebbe l'opportunità di confrontarsi con Wallace Carothers, l'inventore del neoprene, delle poliammidi e dei poliesteri. Al suo rientro, incluse anche i polimeri sintetizzati dallo scienziato americano nei suoi esperimenti sulle proprietà di diluizione delle soluzioni polimeriche, uno studio che gli permise di scoprire la relazione fra viscosità e peso molecolare di un polimero.

Fra il 1939 e il 1945, gli Istituti di chimica e di fisica dell'Università di Friburgo divennero stra-

**Nel 1940 fu inaugurato l'Istituto di Chimica Macromolecolare, il primo dedicato alla scienza dei polimeri, di cui Hermann Staudinger fu direttore.**

tegici per lo sforzo bellico e ricevettero fondi adeguati da fonti industriali e governative. Nel 1940 fu inaugurato l'Istituto di Chimica Macromolecolare, il primo in Europa dedicato esclusivamente alla scienza dei polimeri, di cui Hermann Staudinger fu direttore da quel momento fino al 1956.

Nel 1943 fondò una delle riviste più importanti sulla chimica dei polimeri, il *Journal für makromolekulare Chemie*, che dopo la guerra cambiò editore e nome, *Die Makromolekulare Chemie*, ed è ancora attiva, anche se dal 1994 si chiama *Macromolecular Chemistry and Physics*.

I primi anni '40 hanno visto nascere una nuova disputa sulla struttura dei polimeri, perché Staudinger era convinto che le loro molecole fossero come bastoncini rigidi, e non accettò mai l'ipotesi di Herman Mark – un altro grande padre della scienza macromolecolare – per il quale i polimeri erano costituiti da zone a morfologie differenti in cui si potevano trovare anche strutture simili a matasse aggrovigliate. In realtà, le due visioni sono complementari, ma il conflitto fu aspro perché i due scienziati finivano sempre per litigare in toni così accesi da arrivare agli insulti. C'è da dire che Staudinger aveva un bel caratterino, perché era sempre il primo ad attaccare briga, sopportava male le critiche e tendeva a dividere il mondo in amici o nemici, considerando quasi sempre intrusi, concorrenti o plagiari i professori universitari che lavoravano nel suo campo.

Il 27 novembre 1944 la città di Friburgo fu bombardata dagli Alleati e l'Istituto di Chimica Macromolecolare fu gravemente danneggiato.

### 1945-1965: un Nobel ritardato

A partire dal 1947, grazie al lavoro degli assistenti e degli studenti, fu recuperato tutto il possibile dalle aree meno danneggiate dai bombardamenti e riprese così l'attività di ricerca, seppur in forma ridotta. Staudinger aveva 66 anni e la parte più importante della sua carriera scientifica era ormai alle sue spalle. Nel 1951 andò in pensione, ma accettò per altri cinque anni la direzione onoraria dell'Istituto di Chimica Macromolecolare, nel frattempo



I polimeri hanno rivoluzionato non solo la chimica, ma la nostra vita quotidiana.

diventato un ente di ricerca governativo. Tuttavia, la scarsità dei finanziamenti gli impedì di trasformarlo nella grande istituzione internazionale di studio sui polimeri che aveva sempre sognato.

Finalmente, nel 1953, all'età di 72 anni, fu insignito del premio Nobel per la Chimica, un riconoscimento meritato e a lungo sofferto.

Dopo il ritiro definitivo dall'attività scientifica, la sua salute cominciò a peggiorare a causa di problemi cardiaci, anche se Staudinger si teneva sempre al corrente dei progressi della sua disciplina e della situazione politica mondiale. Fu testimone dell'avvio delle esplorazioni spaziali, il cui sviluppo è stato reso possibile proprio grazie a materiali polimerici adatti a resistere a particolari condizioni ambientali.

Hermann Staudinger trascorse l'estate del 1965 nel suo giardino, in mezzo alle piante che aveva sempre amato, e si spense l'8 settembre di quell'anno.

Il concetto di polimerizzazione di fatto ha avuto molti padri, perché nella scienza una teoria è quasi sempre frutto del contributo di più ricercatori e così è stato anche per la scienza dei polimeri. Indubbiamente, però, Hermann Staudinger è stato il primo a confermare sperimentalmente l'esistenza delle macromolecole.

### Riferimenti bibliografici

[1] V. PERCEC (a cura di), *Hierarchical Macromolecular Structures: 60 Years after the Staudinger Nobel Prize I*, Springer International Publishing, Cham 2013.

[2] E. POLO, *C'era una volta un polimero. Storie di grandi molecole che hanno plasmato il mondo*, Maggioli, Santarcangelo di Romagna 2013.



Patrizia Caraveo  
**Il cielo è di tutti**

Nicola Armaroli  
**Emergenza energia**  
Non abbiamo più tempo



Jacques Le Goff - J.-C. Sournia  
**Per una storia delle malattie**

Brigitte Munier  
**Storia dei profumi**  
Dagli dèi dell'Olimpo al cyber-profumo



Bruno D'Amore - Silvia Sbaragli  
**La matematica e la sua storia**  
IV. Dal XVIII al XXI secolo

# L'invenzione di Google: come due nerd hanno cambiato il mondo

di Vincenzo Palermo

La tesi di laurea (come quella di dottorato) è spesso una formalità, letta solo dall'autore e dal suo professore per poi essere rilegata con cura, e riposta per sempre su uno scaffale. In casi particolari, però, il lavoro di tesi può cambiare la tua vita. In casi *molto* speciali, può cambiare il mondo, e trasformarti in un miliardario.

Nel 1996 Larry Page e Sergey Brin sono due studenti dell'Università di Stanford che scelgono, per la tesi di dottorato, un argomento abbastanza astruso: le proprietà matematiche del World Wide Web.

L'invenzione e il successo di internet hanno creato il bisogno (che oggi diamo per scontato) di orientarsi tra le migliaia di pagine web disponibili. Le prime soluzioni sono abbastanza tradizionali: veri e propri libroni cartacei di "pagine bianche" che elencano, in ordine alfabetico, migliaia di siti. Questa soluzione non è però sostenibile, e nascono i primi motori di ricerca. Yahoo!, nato nel 1994, utilizza autori umani per visitare, una a una, le pagine web e scriverne una descrizione.

Il web è un'enorme rete che connette milioni di pagine, con ogni pagina che punta ad altre pagine tramite *link*. Page e Brin notano che questa rete è analoga a quella della letteratura scientifica; ogni articolo scientifico è di solito "citato" da articoli sullo stesso argomento pubblicati successivamente. Un articolo citato da altri 100 articoli è più importante di uno citato solo da 30. Page e Brin decidono di usare lo stesso approccio per classificare l'importanza di una pagina riguardo a una data ricerca. In pratica, creano un programma che vaga da una pagina web all'altra (un *random surfer* o un *crawler*), seguendo link. Se il surfer arriva spesso su una data pagina, vuol dire che quella pagina ha molti link da altre pagine, e quindi è importante! Cercando, ad esempio, "Bill Clinton", il loro motore di ricerca non conta quanti "Bill Clinton" contiene il testo della pagina, ma quante pagine "linkano" ad essa per l'argomento Bill Clinton. I link che puntano a una data pagina

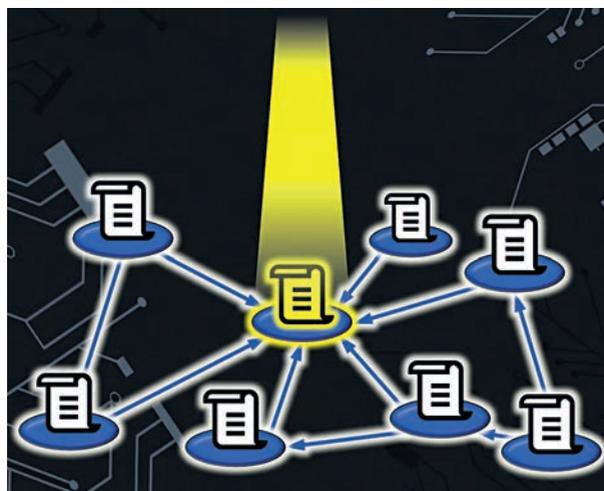
contengono informazioni sul bersaglio, permettendo di classificare anche oggetti come immagini e video che non hanno, di per sé, testo ricercabile.

L'algoritmo comincia a girovagare per internet a marzo del 1996, partendo dalla pagina dell'Università di Stanford. In 9 giorni ha scaricato e classificato circa 26 milioni di pagine web. Ad agosto 1996, Google – così lo chiamano – diventa accessibile a tutti gli utenti di internet.

Cominciano ad arrivare soldi. Un possibile finanziatore, dopo aver visto una demo, dice semplicemente: "Invece di discutere i dettagli, perché non vi firmo direttamente un assegno?". L'assegno di centomila dollari è intestato a una ditta, "Google Inc.", che non esiste. Page e Brin la registrano il 4 settembre del 1998, scegliendo come ufficio il garage di una loro amica.

Alcuni articoli di riviste informatiche notano la pagina Google e la giudicano molto più innovativa dei "portali" come Yahoo!, Excite, Lycos, AOL.com, ecc. che dominano la rete.

Nonostante il successo, Page e Brin non pensano che Google possa avere un ruolo importante



L'algoritmo di Google giudica una pagina importante quando tante altre pagine puntano ad essa.

nel loro futuro; cercano di vendere la ditta per tornare alla carriera scientifica, ma non ci riescono!

Nel 1999 offrono Google in vendita al CEO del colosso Excite, per la modica cifra di un milione di dollari. Ma Page pretende che Excite rimpiazzi tutto il suo software con Google, e un confronto di velocità tra Excite e Google non dà i risultati sperati. Nel 2002 il CEO di Yahoo! offre invece 3 milioni di dollari, ma ora Page e Brin ne chiedono 5; anche qui non si trova un accordo e Page e Brin si rassegnano a diventare imprenditori.

Il resto è storia. Oggi Google.com è usato da circa 4 miliardi e mezzo di persone in 160 nazioni in 123 linguaggi diversi; il verbo "to google" è entrato ufficialmente nel dizionario della lingua inglese (in italiano la traduzione è "googlare"). Google ci fornisce immediatamente risposte di ogni tipo, dal menù del ristorante sotto casa sino alla risposta alla domanda fondamentale sulla vita, l'Universo e tutto quanto (per la cronaca, la risposta è 42 come spiegato in *Guida galattica per gli autostoppisti*). Page e Brin sono tra i 15 uomini più ricchi del mondo con un patrimonio stimato di 50 miliardi di dollari a testa. Con gli anni Google si è espansa acquisendo YouTube, il sistema operativo Android, Chrome e tanto altro ancora.

L'espansione in tutti i settori è continua. Ad esempio, forse non molti sanno che Google ha provato a digitalizzare tutti i libri mai pubblicati dall'umanità (circa 130 milioni di titoli); il progetto si è fermato per motivi legali dopo circa 25 milioni di titoli, ma rende l'idea dell'enorme quantità di dati che Google può organizzare, inserire in un computer e ricercare in maniera quasi istantanea.

Google ha il 90% del mercato; il secondo motore di ricerca più usato dopo Google è YouTube, che da solo è più grande degli inseguitori, Bing, Yahoo! e Ask messi insieme, ed è comunque proprietà di Google.

Un monopolio così completo suscita quesiti etici, per la sua capacità di influenzare il mondo reale. Nel loro articolo rivoluzionario, Page e Brin esprimevano dubbi sull'onestà di un motore di ricerca che potrebbe, per loro stessa ammissione, migliorare il punteggio e la visibilità di aziende "amiche" danneggiando le altre. Oggi, passare dalla prima alla seconda pagina dei risultati di ricerca di Google può significare



Larry Page e Sergey Brin all'epoca della loro invenzione.

la fine per un'azienda, e infatti le aziende pagano, e pagano bene, per le prime posizioni. Il motto iniziale di Google "Non fare del male" è stato parzialmente sostituito, durante la ristrutturazione in Alphabet del 2015, con "Fa' la cosa giusta".

Da piccolo sognavo di avere un qualcosa di simile al genio della lampada, che potesse immediatamente rispondere a una qualsiasi domanda su libri, film, fumetti... o qualsiasi altra cosa.

Oggi tutti noi abbiamo a disposizione questo genio nelle nostre lampade tascabili; le informazioni, anche se facili da avere, riflettono però in parte il modo con cui sono selezionate e classificate. Google potrebbe, se usata male, cancellare un qualsiasi evento dai suoi risultati, e quell'evento svanirebbe agli occhi della maggior parte dell'umanità. Speriamo che Larry e Sergey, i due nerd che volevano solo studiare la matematica di internet, sfruttino questo enorme potere per il bene di tutti.

Ho appena controllato la mia cronologia di ricerca: oggi ho usato il sito Google circa 65 volte; l'utente medio lo usa 3-4 volte al giorno.

Ops, ora sono 66.



Vincenzo lavora al Consiglio Nazionale delle Ricerche, dove monta assieme atomi e molecole per creare nuovi materiali. Ha pubblicato *La versione di Albert* (2015), un libro sulla vita e le idee di Albert Einstein, e *Newton, la mela e Dio* (2016) sulla vita di Isaac Newton.

# Darwin a Manhattan

di Enrico Bonatti

Un utente abituale o occasionale della Metro di New York avrà avuto modo di osservare, di tanto in tanto, qualche grosso topo aggirarsi giù in basso tra i binari. All'avvicinarsi di un treno e del fracasso infernale che lo accompagna, il roditore si nasconde in qualche cavità vicino o sotto ai binari, per poi riapparire quando il treno riparte dalla stazione. Tutti i sindaci che si sono succeduti alla guida di New York nell'ultimo secolo hanno promesso nelle loro campagne elettorali di eliminare o almeno ridurre drasticamente la popolazione di questi grossi ratti, con risultati scarsi o nulli. Il fallimento delle autorità cittadine nella loro guerra contro i ratti del sottosuolo di Manhattan ha avuto, per lo meno, un risvolto positivo: ha permesso studi approfonditi dell'evoluzione della loro popolazione, con risultati inaspettati e interessanti.

Lo studio più completo dei ratti di Manhattan è la tesi di dottorato di Michael Combs della Fordham University, pubblicata in parte dalla rivista *Molecular Ecology* nel 2017 [1]. Combs e i suoi collaboratori sono riusciti a catturare oltre 300 esemplari di roditori dalle varie zone di Manhattan, e a determinare il loro DNA da un frammento della coda. La grande maggioranza dei roditori newyorkesi appartiene al genere *Rattus norvegicus*, o ratto delle chiaviche. Usando dati sulla distribuzione globale di genotipi di ratti, i gruppi di ricerca di Puckett [2] e Combs hanno stabilito che i roditori di Manhattan derivano da popolazioni europee, provenienti in prevalenza dalla Gran Bretagna. Non ci sono evidenze di provenienza da altre regioni geografiche.

Questi risultati riflettono gli eventi che hanno portato all'origine e allo sviluppo della città di New York, legati inizialmente a quando il "Nuovo Mondo" era ancora un possedimento inglese, che riceveva l'influsso di numerosi migranti britannici. Gli antenati degli odierni ratti di Manhattan arrivarono dunque nelle Americhe tra il 1750 e il



*Rattus norvegicus* tra i binari della metro di New York.

1780, a bordo delle stesse navi che in quegli anni trasportavano nel Nuovo Mondo i coloni inglesi.

Vi furono poi ondate successive di immigrazione da altre regioni europee e non europee nell'area di New York, inclusa la forte immigrazione italiana tra la fine dell'Ottocento e l'inizio del Novecento. Questi flussi umani furono certo accompagnati da sbarchi di roditori geneticamente diversi da quelli britannici arrivati in precedenza. Ma questi ultimi evidentemente avevano già occupato gli spazi "vitali" (per i ratti!) di New York: i nuovi arrivati non hanno avuto modo di formare comunità stabili o di influenzare in maniera significativa il pacchetto genetico dei ratti delle chiaviche newyorkesi.

Si è trovato che i ratti di Manhattan nella loro vita normale tendono a non allontanarsi più di 200 o 300 metri dal loro luogo di nascita; solo eccezionalmente si spostano di un kilometro o poco più. Ma un'analisi statistica dei dati del DNA ha portato alla scoperta più interessante di Combs: i ratti di Manhattan si sono separati in due grandi gruppi con caratteristiche genetiche differenziate, quelli della zona nord (*uptown*) e quelli della zona sud (*downtown*). Questa separazione è legata all'attività di *Homo sapiens*. Infatti, le due zone sono den-

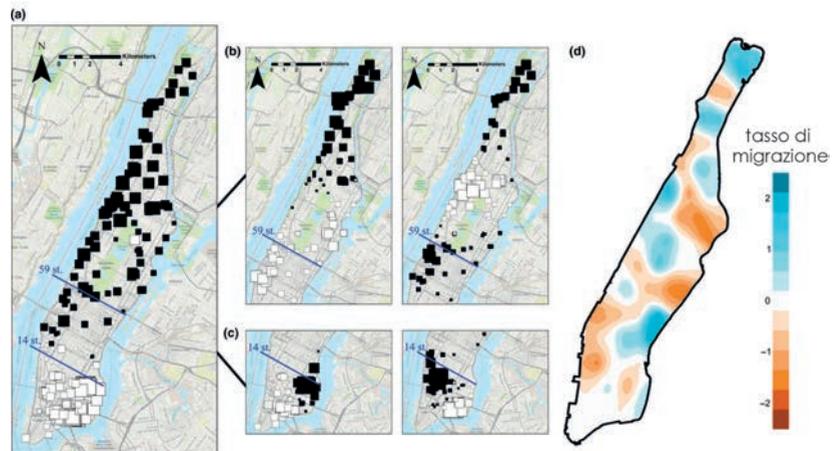
samente popolate e prevalentemente residenziali e sono separate dai quartieri della *Midtown*, dove prevalgono attività commerciali e sono situate le sedi delle grandi aziende. Questa zona di separazione che va dalla 59<sup>a</sup> alla 14<sup>a</sup> strada, essendo scarsamente residenziale, ha una produzione di rifiuti alimentari relativamente bassa, il che la rende poco attraente per il *Rattus norvegicus*. La comunicazione tra i ratti dell'area nord e quelli dell'area sud di Manhattan attraverso la *Midtown* degli affari è scarsa, anche perché, come detto, questi roditori tendono a non allontanarsi troppo dal loro luogo di nascita.

Le due comunità si sono evolute in maniera separata e indipendente, sviluppando gradualmente uno spettro genetico diverso. Questa diversificazione è avvenuta in tempi rapidi se pensiamo che *Rattus norvegicus* è arrivato a Manhattan non prima della fine del Settecento, e che la separazione tra i due quartieri prevalentemente residenziali è avvenuta gradualmente e in parallelo con la stabilizzazione delle comunità di *Homo sapiens*.

Il ratto di chiavica si è stabilito e ha proliferato a Manhattan grazie alla presenza dell'uomo, dal quale è stato però combattuto in una guerra senza quartiere. I roditori newyorkesi sono divenuti protagonisti importanti della lotta politica per il governo della città.

Sulla base di osservazioni empiriche, senza alcuna pretesa di scientificità, accumulate in quarant'anni di frequentazione della Metro newyorkese, chi scrive pensava che la popolazione dei roditori della Metro di Manhattan fosse in diminuzione. Ma dati ufficiali ottenuti dall'amministrazione cittadina mostrano invece che gli "avvistamenti" di ratti sono aumentati di oltre il 50% negli ultimi anni; cioè, il numero dei ratti residenti sia nel nord che nel sud di Manhattan è aumentato notevolmente.

Questo incremento è stato attribuito a cambiamenti del clima: inverni meno rigidi ed estati molto calde favoriscono nidiate abbondanti e frequenti nelle famiglie dei ratti. Ma l'opposizione repubblicana, guidata da alcuni seguaci di Trump, accusa invece di negligenza e di incapacità il sindaco de-



Distribuzione del *Rattus norvegicus* a Manhattan (da COMBS *et al.*, 2017). I rettangoli neri indicano caratteristiche genetiche di ratti distribuiti prevalentemente a nord della 59<sup>a</sup> strada; i rettangoli bianchi caratteristiche genetiche diverse, prevalenti tra i ratti che vivono a sud della 14<sup>a</sup> strada. Le dimensioni dei rettangoli indicano il grado di differenziazione genetica del gruppo di appartenenza relativamente al gruppo opposto.

mocratico de Blasio. La rivista *New Yorker* rivelava qualche mese fa alcune contromosse del sindaco, tra cui lo stanziamento di parecchi milioni di dollari per una *Extermination Task Force* incaricata di condurre una guerra senza quartiere contro il *Rattus norvegicus* del sottosuolo newyorkese.

Già una ventina di anni fa l'allora sindaco Rudolph Giuliani, questa volta repubblicano, aveva lanciato una sua Task Force contro i ratti della città, i quali però resistono e continuano a evolversi indifferenti al colore politico del sindaco della "loro" città.

I ratti newyorkesi dimostrano che l'evoluzione darwiniana procede non solo nelle giungle africane e amazzoniche, nelle steppe dell'Asia o nelle profondità degli oceani, ma anche nei meandri sotterranei delle nostre metropoli.

#### Riferimenti bibliografici

- [1] M. COMBS *et al.*, "Spatial population genomics of the brown rat (*Rattus norvegicus*) in New York City", *Molecular ecology*, 27, 1, 2017, pp. 83-98.
- [2] E.E. PUCKETT *et al.*, "Global population divergence and admixture of the brown rat (*Rattus norvegicus*)", *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 283, 1841, 2016.

Enrico ha condotto ricerche su vari temi delle Scienze della Terra, principalmente sulla geologia degli oceani, alle Università di Yale, della California, di Miami, di Pisa, di Roma, alla Columbia e al CNR. È membro dell'Accademia delle Scienze Russa, dell'Accademia dei Lincei e Fellow dell'American Geophysical Union.

# FISICA? UN GIOCO

## L'approccio migliore

Federico Benuzzi



La convinzione che la natura sia espressione di bellezza, simmetria ed eleganza ha da sempre spinto alcuni scienziati a introdurre *ad hoc* entità nuove, per adattare le loro teorie a tali caratteristiche. Per far sì, in altre parole, che la descrizione del mondo fosse conforme alle loro credenze.

Secondo Tolomeo, per esempio, la Terra *doveva* essere al centro del Creato e le orbite dei pianeti *dovevano* essere circolari! E così il Sole e tutti gli altri astri, nel modello geocentrico, ruotavano attorno al nostro pianeta disegnando un cerchio perfetto: il *deferente*. Ma dato che questo non descriveva adeguatamente la posizione relativa dei pianeti o le eclissi, si introdussero orbite secondarie, gli *epicicli*, sempre circolari, su cui ogni astro "realmente" si muoveva. E così la nostra stella, secondo i tolemaici, descriveva un cerchio, un epiciclo appunto, il cui centro si muoveva sul deferente.

Ogni volta che i conti non tornavano e che la descrizione non era aderente alle osservazioni, si introduceva un nuovo epiciclo, nel tentativo continuo di salvare le credenze su cui si fondava il modello. Solo rinunciando al cerchio in favore della meno elegante ellisse e alla centralità del nostro pianeta in favore del Sole (relegato in realtà in uno dei fuochi dell'ellisse), fu possibile rendere il modello più semplice e aderente alla realtà.

Secondo i fisici della fine del XIX secolo, elettricità, luce e magnetismo *non potevano* propagarsi nel vuoto (*horror vacui*) e così furono introdotti *ad hoc* gli eteri: sostanze impalpabili che interagivano solo con ciò per cui erano state introdotte, bastioni mentali di difesa eretti dal nulla. E quando Maxwell dimostrò che i tre fenomeni altro non erano che facce di una stessa medaglia, le onde elettromagnetiche, anche l'etere divenne solo uno: lo spazio assoluto, sistema di riferimento

privilegiato, alla faccia della relatività del moto. Ci volle il lavoro di Einstein del 1905 per riuscire ad abbandonare questa idea e vedere il mondo per quello che è.

Ma non sempre questa resilienza delle teorie fisiche è stata fallimentare: l'esistenza del neutrino venne postulata da Pauli nel 1930 perché, durante lo studio dei decadimenti beta, alcuni principi di conservazione sembravano non essere rispettati. La nuova particella subatomica venne quindi introdotta *ad hoc* perché il fisico austriaco *credeva* nella validità dei principi di conserva-

zione. La successiva scoperta del neutrino e come questo abbia aiutato a capire le reazioni nucleari nelle stelle, nei reattori e nelle bombe sono ormai storia.

Il sapere scientifico si è quindi da sempre evoluto tra induzione e deduzione, senza che uno dei due approcci si sia mai imposto sull'altro come "migliore", ma riportando ognuno successi e sconfitte.

Una delle conseguenze della relatività generale einsteiniana è che l'Universo non può essere stabile.

Einstein, lui che aveva costruito le sue fortune e i suoi lavori sulla deduzione, non poteva accettarlo e introdusse *ad hoc* la *costante cosmologica*, che avrebbe dovuto bilanciare, nelle sue intenzioni, l'effetto attrattivo della gravità. Purtroppo si rese conto ben presto che le nuove equazioni ottenute descrivevano un Universo ancora più instabile e dovette fare marcia indietro. Quando poi Hubble ne verificò l'espansione, Einstein definì quell'"epiciclo" *il più grande errore della sua vita*. Peccato che non seppe mai che l'Universo si sta espandendo, sì, ma accelerando! E uno dei modelli usati oggi per descriverlo si basa proprio sulla costante cosmologica... Mannaggia, Einstein! Sta a vedere che aveva ragione anche quando aveva torto!

Federico è fisico, insegnante e giocoliere professionista; per Dedalo ha pubblicato *La legge del perdente* (2018). Per avere informazioni sulle sue attività, divulgative e non: [www.federicobenuzzi.com](http://www.federicobenuzzi.com)



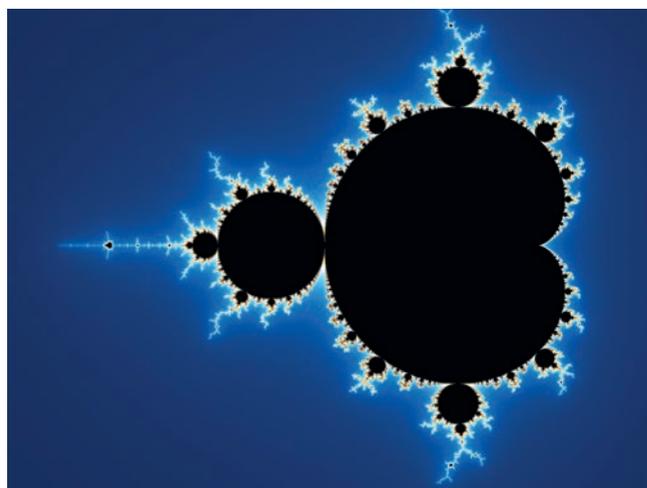
# LA FORMULA



## La matematica dei frattali

Tommaso Castellani

Molti di voi avranno visto la figura qui in basso molte volte in innumerevoli forme: in effetti è un oggetto dalle proprietà strabilianti, inventato dal matematico francese Benoît Mandelbrot. La bellezza delle forme e dei colori mette spesso in secondo piano la sua bellezza matematica, che ha altrettanto fascino: la sua enorme complessità si ottiene infatti con un procedimento semplicissimo.



© Wolfgang Beyer - Wikimedia

Tutto si basa sulla breve formula riportata in apertura, che rappresenta quella che tecnicamente si chiama *successione di numeri complessi*. In pratica, è una serie di numeri in cui il successivo è definito come il quadrato del precedente più un numero  $c$ , ponendo come primo numero 0.

Per esempio, se  $c = 1$ , la successione risulta essere 0; 1; 2; 5; 26; 677 ecc. e quindi cresce all'infinito. Ma se  $c = -1$ , in virtù del fatto che il quadrato di  $-1$  è 1, la successione oscilla all'infinito tra 0 e  $-1$ . Abbiamo fatto due esempi usando come  $c$  due "normali" numeri reali, ma in realtà  $c$  è un numero complesso, cioè un numero a due componenti: semplificando possiamo pensarlo come una coppia di numeri (una delle due componenti, per chi è un po' più esperto, è la parte immaginaria, che

$$\begin{cases} z_0 = 0 \\ z_{n+1} = z_n^2 + c \end{cases}$$

vale 0 nei casi dei numeri reali che abbiamo usato sopra). Le coppie di numeri sono rappresentabili su un piano come coordinate, come nella battaglia navale: per esempio (3; 2) si raggiunge partendo dal centro e facendo 3 passi a destra e 2 in alto. A questo punto siamo pronti per definire l'*insieme di Mandelbrot*: è l'insieme di tutti i numeri  $c$  per cui la successione rappresentata nella formula *non* cresce all'infinito. Usando i nostri esempi precedenti, 1 non fa parte dell'insieme, mentre  $-1$  sì.

Che l'insieme di Mandelbrot avesse una forma non proprio ortodossa era chiaro fin dall'inizio, ma solo con lo sviluppo dei computer si riuscì a visualizzarla in tutto il suo splendore. È proprio la figura che vedete: i punti del piano che appartengono all'insieme sono tutti quelli colorati di nero, mentre gli altri punti vengono colorati in base a quanto rapidamente la successione cresce. Già solo la parte in nero è affascinante, con il suo contorno infinitamente frastagliato, con rami e rametti e anche con numerose mini-repliche dell'insieme iniziale. Molto bella è anche la parte esterna, in cui si creano combinazioni di colori e infiniti annidamenti di forme bizzarre. Ma per gustare a fondo il fascino di questa figura bisogna scoprire cosa succede ingrandendola: in rete troverete numerosi video in cui uno zoom vi mostra quali meraviglie siano contenute in ogni minuscola ramificazione!

Cosa ci insegna questo strano oggetto matematico? L'insieme di Mandelbrot è un caso particolare di *frattale*, un modello che può essere usato per descrivere i più svariati fenomeni naturali, dai fiocchi di neve alle galassie, dagli anelli di Saturno ai broccoli romaneschi. Un altro stupefacente caso di quella che Eugene Wigner chiamò «irragionevole efficacia della matematica».

Tommaso, di formazione fisico, è insegnante, scrittore e divulgatore scientifico. Per Dedalo ha pubblicato: *Equilibrio* (2013), *Il professor Z e l'infinito* (2017) e *I misteri dell'iper cubo* (2020).



# PROTEINE OPERAIE

## Take a walk on the wild side

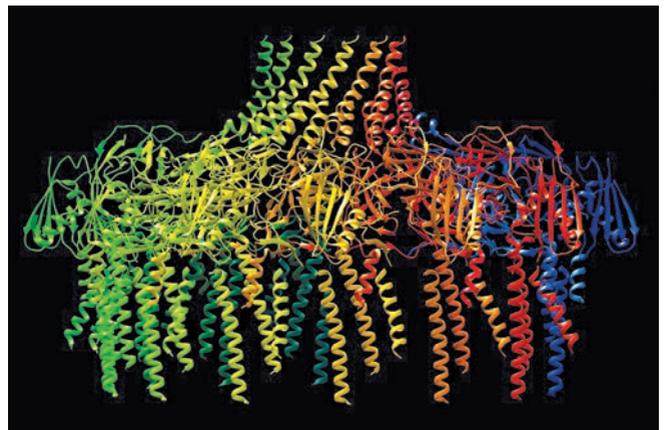
Massimo Trotta



Lou Reed, uno dei moderni cantastorie della New York sporca, complicata e interessantissima nel periodo che va dagli anni '70 ai primi anni '90 dello scorso secolo, suggeriva nella sua canzone *Take a walk on the wild side* di correre qualche rischio nella nostra vita, lasciando la "comfort zone" in cui ogni giorno confermiamo i nostri talenti e le nostre paure, di qualunque tipo. Oggi lasceremo la comfort zone del virus SARS-CoV-2 che tanto ci spaventa, e del quale tanto piace parlare ai sessanta milioni di virologi italiani, per spostarci su un lato ancora più selvaggio: le infezioni batteriche.

Siamo così abituati ad ascoltare le meraviglie del microbioma del nostro intestino, di batteri "amici" da bere con yogurt dalle proprietà eccezionali, e della bellezza del mondo microscopico, che forse dimentichiamo l'incombere dei batteri patogeni. Invece dovremmo sempre tenerlo a mente.

Ecco tre esempi per "geolocalizzare" il tipo di minaccia che i patogeni rappresentano: *Legionella pneumophila* responsabile della legionella, *Helicobacter pylori* responsabile dell'ulcera gastrica e *Bordetella pertussis* responsabile della pertosse. Tre bei tipetti che condividono la medesima strategia di attacco, il terribile *Sistema Secretorio di Tipo IV* (T4SS). Si tratta di un complesso molecolare di grandi dimensioni formato da circa una ventina di proteine differenti, organizzato in due parti principali: il disco inferiore e la cupola superiore. Questa struttura, che rende il T4SS simile ai dischi volanti degli UFO che abbiamo visto in tanti fumetti e film, è perfetta per assolvere ai compiti richiesti per infettare le cellule-obiettivo. La cupola dell'astronave è infatti costituita da un raggruppamento di proteine che servono ad agganciare il T4SS alla membrana esterna, il disco preme contro la membrana esterna e la parte inferiore protrude verso la membrana interna attraverso alcune proteine non ancora completamente identificate. A differenza degli UFO, il complesso proteico è cavo perché una volta agganciato a una



cellula ospite deve interagire con questa per lo scambio di materiali.

Il complesso T4SS siede a cavallo fra la membrana interna e quella esterna del batterio, per interagire con le cellule ospiti e consentirgli di trasferire il proprio contenuto proteico e far ammalare l'ospite. Un'arma versatile e molto efficace che è in grado di interagire anche con altre cellule batteriche per trasferire DNA, attraverso il meccanismo chiamato di *coniugazione*, che è sfortunatamente legato all'aumento della resistenza agli antibiotici di numerosi batteri. Infatti, cellule antibiotico-resistenti di batteri patogeni come questi possono trasferire, insieme al DNA, l'informazione sulla resistenza, rendendo anche le cellule ospite resistenti. Alcune ricercatrici statunitensi hanno recentemente proposto di abbattere l'antibiotico-resistenza attraverso l'inibizione della coniugazione batterica. Sembra una modalità efficace per evitare che il *wild side* diventi un territorio eccessivamente selvaggio per gli uomini.



Massimo è ricercatore presso l'Istituto per i Processi Chimico-fisici del Consiglio Nazionale delle Ricerche di Bari.

# HOMO MATHEMATICUS

## Eventi virali

Roberto Natalini

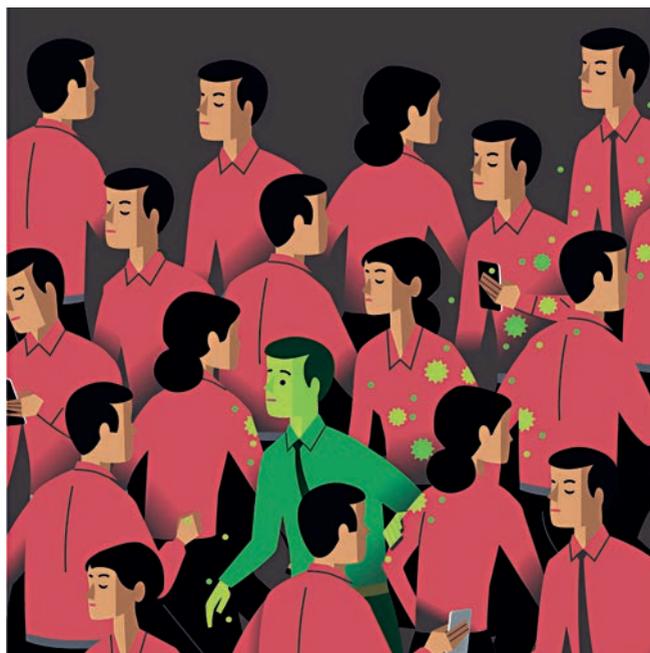


L'Homo Mathematicus vuole aiutare un amico a diffondere una pubblicità per una nuova catena di gelaterie che sta aprendo su scala nazionale. Hanno pensato di dare ad alcuni conoscenti delle magliette con il nome della gelateria stampato sopra, cosicché, quando questi amici passeranno indossando la maglietta, automaticamente si diffonderà la notizia. Ammettiamo che in media ognuno degli amici incontra nella sua passeggiata giornaliera 100 persone, di cui per esempio ce ne siano 30 che osservano con attenzione la pubblicità sulla maglietta. Se gli amici con maglietta sono 10, avremo che ogni giorno 300 persone saranno informate.

Va bene, pensa l'Homo Mathematicus, ma si può fare di meglio. Se forniamo a questi amici uno stock di magliette da distribuire a chi è interessato, e supponendo che solo 10 delle persone incontrate accetti a sua volta la maglietta, avremo che il primo giorno ci saranno 10 persone che distribuiscono 10 magliette ciascuno e sono viste da 30 persone ciascuno. Il secondo giorno ne avremo 110, per cui le magliette distribuite saranno 1100 e saranno viste da 3300 persone. Il terzo giorno ci saranno 1210 persone che distribuiscono 12100 magliette e saranno viste da 36300 passanti. E insomma, andando avanti così, il sesto giorno le persone che avranno visto la maglietta saranno 48282300, che come obiettivo di una campagna pubblicitaria non è niente male, a patto di aver stampato un numero sufficiente di magliette.

Decidono allora di partire con questo piano, che però subito rivela qualche problema. Dopo il primo giorno, in realtà, i 10 amici sono stati visti con attenzione da un totale di sole 60 persone, ma uno ha partecipato a una gara di ballo ed è stato visto da 40 spettatori, mentre le altre 20 "visualizzazioni" sono state raccolte da un paio di amici soltanto. Gli altri non sono proprio usciti, o non indossavano la maglietta o ancora non hanno incontrato nessuno che li abbia osservati.

Il secondo giorno, c'è un po' di scoraggiamento in giro, ma quello che aveva partecipato alla gara di ballo è passato alla selezione regionale, per cui lo hanno



visto 400 persone; riesce però a dare solo 20 magliette, mentre uno di quelli reclutati il secondo giorno va a un matrimonio e incontra 300 parenti a cui riesce a distribuire una maglietta ciascuno. Poi si scopre che uno degli invitati al matrimonio è un famoso presentatore televisivo e il quinto giorno compare in trasmissione con la famosa maglietta. A questo punto le magliette con il gelato si vedono ovunque, e però a forza di farle girare tutti si sono abituati a vederle e nessuno le osserva più attentamente, un po' come se fossero vaccinati.

A questo punto l'Homo Mathematicus crede di aver capito un titolo di giornale che ha appena letto: "Da uno studio sul Covid appena pubblicato si stima che il 10% dei pazienti sia responsabile per l'80% dei contagi". E meno male che non ci si può contagiare guardando la televisione...



Roberto è un matematico ed è direttore dell'Istituto per le Applicazioni del Calcolo del Consiglio Nazionale delle Ricerche.

# SPAZIO ALLA SCUOLA

## Il mondo nuovo di Gianni Rodari

Stefano Sandrelli



Ci sono autori, personaggi storici, cantanti che sono veri e propri luoghi comuni. Si pensa di mettere una mano in tasca e tirarli fuori di lì, come una vecchia monetina che ci fa piacere ritrovare al suo posto. Napoleone, per esempio, o David Bowie o Gianni Rodari. Eppure quanti potrebbero riassumere davvero la storia del primo o le sperimentazioni di Bowie? Waterloo o *Life on Mars*? non sono tutto, ma solo punti momentanei di arrivo.

Per tutti coloro che sono stati piccoli in qualche momento imprecisato del secondo Novecento, tra una favola al telefono e una filastrocca in cielo e in terra, Rodari è stato frequentato intensamente, un vero compagno di giochi, un ispiratore. Negli anni '70, quando avevo 8 o 9 anni e vivevo a Piombino, in quella provincia così cara al nostro scrittore, era difficile trovare chi non conoscesse Giovannino Perdigiorno e Cipollino, figlio di Cipollone e con 7 fratelli («gente per bene, bisogna dirlo subito, però piuttosto sfortunata. Cosa volete, quando si nasce cipolle, le lacrime sono di casa»), magari accanto a Paperino, Paperone, Zorro, Sandokan e Goldrake. Erano gli anni della *Grammatica della fantasia*, che noi ragazzini non conoscevamo, ma che ha segnato uno spartiacque nella sua produzione.

Ma provate a mettere la mano in tasca e tirar fuori la monetina Rodari. Che cosa ne esce? Negli ultimi anni Rodari, unico scrittore italiano vincitore del premio Andersen internazionale nel 1970, il Nobel degli scrittori per l'infanzia, è stato celebrato soprattutto per la sua "fantastica". Dici Rodari e pensi alle filastrocche, alle fiabe al contrario: a tutto il suo armamentario creativo.

Ma spesso si dimentica quale fosse, nella sua visione, la funzione sociale della fantasia. E qui lascio la parola a lui, che scrive:

“Creatività” è sinonimo di “pensiero divergente”, cioè capace di rompere continuamente gli schemi dell'esperienza. È “creativa” una mente sempre al lavoro, sempre a far domande, a scoprire problemi dove gli altri trovano risposte soddisfacenti, a suo agio nelle situazioni fluide nelle quali gli altri fiutano solo pericoli, capace di giudizi autonomi e indipendenti (anche dal padre, dal professore e dalla società), che rifiuta il codificato, che rimani polpa oggetti e concetti senza lasciarsi inibire dai conformismi. Tutte queste qualità si manifestano nel processo creativo.

[...] Se una società basata sul mito della produttività (e sulla realtà del profitto) ha bisogno di uomini a metà – fedeli esecutori, diligenti riproduttori, docili strumenti senza volontà – vuol dire che è fatta male e che bisogna cambiarla.

Per cambiarla, occorrono uomini creativi, che sappiano usare la loro immaginazione.

Aggiunge: «Il senso dell'utopia, un giorno, verrà riconosciuto tra i sensi umani alla pari con la vista, l'udito, l'odorato. Nell'attesa di quel giorno tocca alle favole mantenerlo vivo».



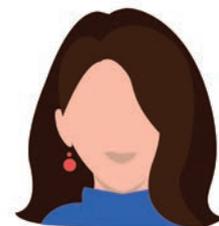
Stefano è astrofisico, scrittore e responsabile della didattica e divulgazione presso l'Istituto Nazionale di Astrofisica – Osservatorio Astronomico di Brera.



# TERRA, TERRA!

## L'estinzione svelata dalle Dolomiti

Alina Polonia



Le Dolomiti sono un riferimento importante per la geologia di tutto il mondo e non smettono di sorprenderci. Tra le rocce di queste spettacolari montagne, che hanno già ispirato molte scoperte geologiche, sono state da poco scoperte le tracce di un'estinzione di massa finora sconosciuta. Già nel XVIII secolo si intuì che le caratteristiche degli strati rocciosi delle Dolomiti suggerivano un'evoluzione della Terra divisibile in quattro ere geologiche principali, dal Paleozoico al Quaternario, separate da brevi periodi di intensi cambiamenti geologici, biologici e ambientali del nostro pianeta. È il caso ad esempio dell'estinzione del Permiano (circa 250 milioni di anni fa), la più grande estinzione di massa che si sia mai verificata sulla Terra, con la scomparsa dell'80% delle specie marine e il 70% dei vertebrati terrestri.

Decifrando attentamente gli strati rocciosi delle Dolomiti, ma soprattutto correlando alcuni livelli chiave su scala globale, un gruppo di studiosi ha scoperto che uno dei cambiamenti epocali della Terra è avvenuto durante il Carnico, un "piano" del Mesozoico che si estende tra 237 e 227 milioni di anni fa, e che prende il nome dalla regione delle Alpi orientali che mostra gli affioramenti rocciosi tipici di questo intervallo di tempo. Queste rocce racchiudono segni inconfondibili di profondi cambiamenti ambientali, con un aumento sensibile della piovosità (Episodio Pluviale Carnico) associato a una grave perdita di biodiversità negli oceani e sulle terre emerse.

Secondo il nuovo studio, questo evento ha causato la scomparsa di oltre il 30% dei generi marini a causa di un cambiamento nel chimismo delle acque oceaniche. Mettendo insieme indizi paleontologici, geochimici e geologici provenienti da diverse parti del mondo, è stato possibile proporre le cause di questo sconvolgimento planetario. La catena di eventi che ha portato all'estinzione di massa ha tratto origine da un fattore scatenante avvenuto oltreoceano. Sembra infatti che la crisi climatica sia stata anticipata da una serie di eruzioni vulcaniche in Canada e Alaska, e



dall'immissione in atmosfera di grandi quantità di gas serra che hanno prodotto un riscaldamento globale associato a un forte aumento delle precipitazioni.

Ma non tutto è venuto per nuocere. L'impoverimento biologico ha lasciato spazio, nel giro di breve tempo, a un'esplosione di nuove forme di vita, al punto che questa estinzione viene anche descritta come l'alba del mondo moderno, proprio a causa della diversificazione esplosiva di molti gruppi di piante e animali, alcuni dei quali dominano gli ecosistemi attuali. Diversamente dalla più famosa estinzione dei dinosauri, al limite Mesozoico-Cenozoico, questa crisi ambientale e il conseguente ricambio di vita sulla Terra deve dunque la sua origine a eventi endogeni, cioè interni al nostro pianeta, e non a un impatto extra-terrestre.



Alina si occupa di geologia presso l'Istituto di Scienze Marine del Consiglio Nazionale delle Ricerche.

# COSCIENZIAT@



## Quale giustizia

Marco Cervino e Cristina Mangia



Si può guardare alle questioni ambientali e alla crisi climatica da tanti punti di vista differenti. Più che ricercare un punto di vista privilegiato urge, in questo momento storico, aprire lo sguardo a ventaglio. L'inquinamento ambientale e la crisi climatica sono due facce dello stesso sistema produttivo. Sebbene siano strettamente interconnesse, le due criticità si sviluppano su differenti ordini di grandezza spazio-temporale e pongono differenti questioni in termini di giustizia e di diritto. Sono interessanti le posizioni di Michele Carducci, costituzionalista dell'Università del Salento, il quale sostiene che il diritto climatico non possa essere considerato un'estensione del diritto ambientale; nei due ambiti il ruolo della scienza può essere differente.

Secondo Carducci l'idea di giustizia ambientale riguarderebbe essenzialmente «rischi e danni rispetto a luoghi e soggetti, in una prospettiva socio-centrica focalizzata sugli effetti». Basti pensare all'iniqua distribuzione dei rischi e dei danni ambientali, come l'ubicazione di discariche o di produzioni inquinanti, in territori abitati da comunità deboli poco propense a opporsi al ricatto-scambio degrado ambientale o lavoro-denaro.

Di "giustizia climatica", ispirata dal fatto che i Paesi maggiormente colpiti dai fenomeni atmosferici estremi siano quelli che meno hanno contribuito allo stravolgimento del sistema climatico in termini di emissioni di gas a effetto serra, si comincia a parlare invece "solo" nel 2002, con il *Climate Justice Summit*, in occasione della Conferenza delle Parti (COP) che si svolgono entro le attività della UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change).

Sintetizzando a nostro modo il pensiero di Carducci (per un'esposizione più estesa si legga il suo intervento negli atti del Congresso dell'associazione Donne e scienza del 2019), il diritto climatico si discosta da quello ambientale in modo radicale: non trae ragione di essere per regolare contenziosi insorti in determinati luoghi con riguardo a determinati



© Lorie Shaull - Wikimedia

danni. Il diritto climatico ha come fonte "speciale" il lavoro dell'UNFCCC, basato sulla scienza climatica. Questa fonte speciale fornisce «definizioni e parole» al diritto climatico, che non possono essere questionate dagli altri attori del diritto, poiché descrivono «fatti di conoscenza» e non fatti ricostruiti nel contenzioso. Il clima coincide con la più importante funzione ecosistemica di regolazione di tutti i processi di interazione tra i viventi, compresa la specie umana. Esso, pertanto, è un fatto regolativo, presupposto al diritto.

Se il diritto è "far cose con regole e parole", in quello climatico le parole le mette la scienza; le regole non possono alterare i fatti di conoscenza; rimane ampia la discussione sulle cose da fare. Ad esempio, come sanzionare i responsabili delle emissioni di oggi, che ledono il diritto a un clima non stravolto ( assunto come contenimento del riscaldamento globale entro il grado e mezzo) per i ragazzi di oggi e domani. Insomma, il diritto climatico entra appieno nella sfera di interesse delle e dei coscienziat@.



Marco e Cristina svolgono ricerche su ambiente e salute presso l'Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima del Consiglio Nazionale delle Ricerche.

# INNOVAZIONE 4.0

## Un FLASH di elettroni contro il cancro

Antonella Del Rosso

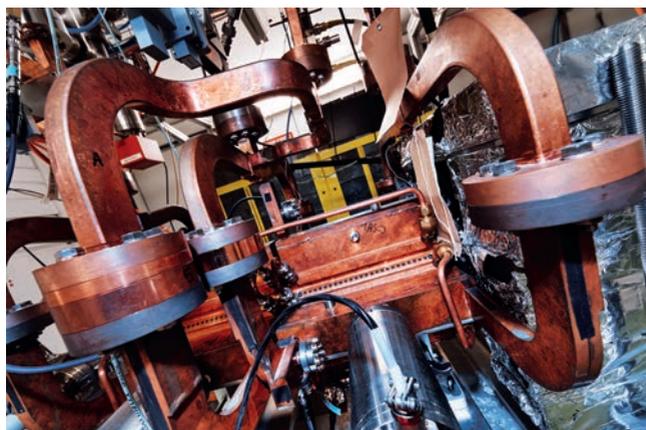


Da più di un secolo ormai abbiamo imparato a utilizzare fasci di fotoni per “illuminare” l’interno del nostro corpo (con tecniche radiografiche e, molto più avanzate, di tomografia computerizzata) o addirittura per curarlo (radioterapia, bisturi laser, ecc.). Risale invece a quasi 70 anni fa la storia dell’utilizzo di fasci di particelle massive – in larga parte protoni, ma anche ioni di vario tipo, tra cui quelli del carbonio – per curare tipologie specifiche di cancro. L’ultima novità in questo campo è l’utilizzo di fasci di elettroni ad alta energia che vengono puntati dritti su un bersaglio tumorale.

Si chiama “effetto FLASH” e si manifesta quando una dose elevata di radiazioni viene somministrata quasi istantaneamente, nello spazio di qualche millisecondo invece che di minuti come è la prassi negli odierni trattamenti radioterapici a più bassa intensità. Studi clinici su pazienti oncologici hanno dimostrato che il fascio di elettroni ad alta energia riesce a danneggiare il tessuto tumorale allo stesso modo della radioterapia convenzionale, mentre il tessuto sano sembra essere meno colpito. Gli studi sono ancora all’inizio, ma i risultati fanno sperare in una forte riduzione degli effetti collaterali causati dalla terapia.

Produrre fasci di elettroni ad alta energia e molto intensi non è però semplice. Per farlo, l’ospedale universitario (CHUV) di Losanna, in Svizzera, ha richiesto l’aiuto del CERN. A lavorare su una tale innovazione tecnologica è stato il team di esperti che aveva già lavorato allo sviluppo del Compact Linear Collider (CLIC), una macchina che aveva come scopo quello di accelerare fasci potenti di particelle ad alta energia e in poco spazio.

Il CERN non è nuovo a progetti di sviluppo di acceleratori compatti. Ricordiamo che uno di questi acceleratori, MACHINA, sviluppato dall’Istituto Nazionale di Fisica Nucleare in collaborazione con il CERN, viene attualmente utilizzato dai laboratori dell’Opificio delle Pietre Dure di Firenze in studi di diagnostica non invasiva per il restauro e lo studio dei materiali di reperti storici e opere d’arte.



© CERN

Tornando alla terapia FLASH, i dati medici finora ottenuti sono molto promettenti. Gli effetti collaterali sembrano davvero ridotti e il nuovo acceleratore sembra in grado di fornire fasci così efficienti che si potranno curare tumori situati anche a 15-20 centimetri di profondità. La terapia ha un impatto positivo anche nella gestione generale dei pazienti, che devono rimanere in ospedale per un tempo minore, perché il trattamento è estremamente rapido e si sostituisce alle tradizionali sessioni multiple di qualche minuto ciascuna. Per finire, i costi di una macchina acceleratrice compatta sono più contenuti delle macchine che attualmente vengono utilizzate, per esempio, nella terapia adronica (basata sull’utilizzo di fasci di particelle massive come i protoni).

La prima fase dello studio medico portato avanti dall’ospedale svizzero in collaborazione con il CERN si è appena conclusa. Tutto fa sperare che abbiamo di nuovo raggiunto un risultato storico nella lotta contro il cancro. Di sicuro, abbiamo la speranza di una nuova arma che presto, ci auspichiamo, potremo utilizzare ovunque.

Antonella si occupa di comunicazione scientifica al CERN di Ginevra.

# L'ISTINTO MUSICALE

## La leggenda degli Stradivari

Philip Ball



Oggi, per la prima volta in quasi 250 anni, è possibile ascoltare il violino di Mozart. Christoph Koncz, secondo violinista principale della Filarmonica di Vienna, ha avuto il permesso di usare lo strumento, tenuto sotto chiave presso la Fondazione Mozarteum a Salisburgo, al fine di registrare per la prima volta i cinque concerti per violino di Mozart (usciti a ottobre per la Sony). Gli è stato perfino consentito di portarlo fuori da Salisburgo, sotto scorta, per esibirsi a Colonia.

Finalmente lo strumento è utilizzato allo scopo per il quale era stato costruito, anziché solo come oggetto di venerazione. Ma cosa può dare alla musica? «Il suono che produco col violino è probabilmente molto simile a quello che udiva Mozart con le sue orecchie», afferma Koncz. «È quanto più vicino potremo mai avvicinarci a Mozart stesso».

Ciò migliorerà la musica di Mozart? È un buon violino, ma non il migliore. Probabilmente l'aveva acquistato suo padre quando Mozart era ancora giovane e forse era stato costruito da Aegidius Klotz di Mittenwald, in Baviera, che godeva di una certa fama a metà del XVIII secolo. A differenza degli strumenti antichi di molti violinisti di oggi, non è stato modificato per dargli la proiezione acustica necessaria nelle moderne sale da concerto. Secondo Koncz «le corde basse non hanno un suono particolarmente intenso o sonoro, ma le corde alte proiettano molto meglio e hanno un suono dolce e melodioso». Ne descrive il suono nel suo complesso come «argentino e brillante».

Tuttavia, ciò che udiamo dipende tanto dalle nostre aspettative quanto da ciò che viene suonato. Fino a poco tempo fa si riteneva che i violini migliori, soprattutto quelli costruiti dalle famiglie Stradivari e Guarneri nel XVII e XVIII secolo, suonassero meglio di qualsiasi altro strumento potessero costruire i liutai moderni. Si è molto discusso sulle caratteristiche che conferivano ad essi una simile superiorità. Si trattava della qualità del legno? Della ricetta segreta della vernice di Stradivari?

Eppure, quando i violinisti si sono finalmente persuasi a sottoporli a un test cieco, i loro inestimabili stru-



menti antichi non hanno dato buoni risultati. Da uno studio realizzato nel 2017 che metteva a confronto degli Stradivari con strumenti moderni, è risultato che esperti liutai, musicisti e critici erano tutti abbastanza d'accordo nel ritenere che gli strumenti moderni suonassero e proiettassero meglio. Ci stavamo ingannando da soli per tutto questo tempo?

Non necessariamente. La qualità dipende ovviamente tanto dallo strumento quanto da chi suona. I virtuosi che usano preziosi violini antichi dedicano molte ore a impadronirsene e a trarne il meglio, e la convinzione della loro superiorità probabilmente farà sì che la loro esecuzione migliori quando usano uno di questi strumenti. E gli ascoltatori tendono a percepire la qualità quando se l'aspettano, come gli amanti del vino giurano che un vino è migliore se gli è stato detto che è invecchiato. Così, ascoltare strumenti venerati come quello di Mozart ci ricorda che la musica non è solo un fatto di acustica, ma di percezione. Non dipende solo dal legno, dalle corde, dall'aria, ma anche dalla mente.



Philip, chimico e fisico inglese, è un divulgatore scientifico freelance. Per Dedalo ha pubblicato *L'istinto musicale* (2011).

# MOLECOLE IN CUCINA

## Il nuovo Concorso internazionale di cucina nota a nota è aperto!

Hervé This



Da nove anni organizziamo un Concorso internazionale sulla cucina nota a nota, l'innovativa tecnica culinaria che utilizza composti chimici al posto degli alimenti tradizionali. Questo non significa che frutta, verdura, carne, pesce e uova siano vietati: è solo il tentativo di dar vita a un'arte culinaria contemporanea dai metodi analoghi a quelli della musica elettronica. La qualità dei risultati? Dipenderà dal talento del cuoco.

Il tema del nuovo concorso è «le sospensioni». Di cosa si tratta? Secondo il *Gold Book* della International Union of Pure and Applied Chemistry, una sospensione colloidale è una dispersione di elementi solidi in un liquido o in un solido.

Se mescolate zucchero e olio, ad esempio, le molecole di saccarosio non si sciolgono, ma restano in sospensione. E se le particelle disperse sono più piccole di 15 micrometri non vi accorgete nemmeno della loro presenza, come accade con il concaggio del cioccolato quando il burro di cacao avvolge i cristalli di zucchero dando origine a un preparato cremoso.

Tornando alle sospensioni, le combinazioni possibili sono numerose. Per il liquido, possiamo scegliere olio, etanolo o una soluzione acquosa di composti sapidi. Per la parte solida, oltre a tutti gli zuccheri, ci sono i sali minerali e i molti composti organici presenti negli ingredienti tradizionali, come gli acidi (malico, tartarico, citrico, ascorbico, per citarne alcuni), gli amminoacidi (pensiamo ai cristalli di tirosina presenti in molti formaggi stagionati) e i loro derivati come il glutammato monosodico.

E dato che limitarsi a due fasi è troppo semplice, perché non realizzare sospensioni più complesse, disperdendo un gel? Ricordiamo che un gel è un sistema "solido" che racchiude un liquido. Il formalismo dei sistemi dispersi, introdotto nel 2001 per descrivere i sistemi colloidali, permette di dimostrare che



esistono 16 gel semplici (a due fasi) ma circa 1500 gel di "classe 2", leggermente più complessi.

Una volta decisa la struttura del sistema bisogna definire le proporzioni delle fasi, al fine di ottenere la consistenza desiderata. Se gelificate l'amido di mais (composto quasi interamente da amilopectina, un polimero ramificato del glucosio), potete disperderlo in acqua o in olio, ma a seconda delle proporzioni otterrete una sospensione molto liquida o più pastosa.

E il gusto? Dobbiamo pensare al sapore (aggiungendo composti idrofili) ma anche all'odore (composti idrofobi, pur in quantità minime) e all'attivazione del sistema trigeminale (sensibile a composti pungenti o rinfrescanti). Per il colore, basterà scegliere uno dei tanti coloranti alimentari.

Concludiamo con un esempio: prendete dell'amido di mais e scaldatelo in acqua in cui avrete sciolto sale, glucosio, glutammato monosodico e un colorante rosso, e disperdete i granuli di amilopectina gelificata così ottenuti.

Hervé è un chimico-fisico francese, direttore dell'International Centre for Molecular Gastronomy AgroParisTech-INRA e padre della gastronomia molecolare. Per Dedalo ha pubblicato: *La scienza in cucina* (2010) e *La cucina nota a nota* (2017).

# NUMERI IN GIOCO

## Lo spirito-guida

Ennio Peres



Il prestigiatore James Randi, fondatore del Comitato internazionale di indagine scientifica sul paranormale (Committee for Skeptical Inquiry, CSI), racconta nel seguente modo l'esperienza che, a 13 anni, gli capitò di vivere, partecipando a una seduta spiritica:

Capii immediatamente, grazie alla mia passione per i giochi di prestigio, che il medium stava usando un trucco di magia; [...] mi sentii ribollire il sangue dalla rabbia e non riuscii a trattenermi: saltai in piedi e mi misi a gridare, svelando a tutti lo squalido artificio. Ma con mia enorme sorpresa, invece di ringraziarmi, gli altri partecipanti cercarono in tutti i modi di zittirmi e di allontanarmi, finché chiamarono addirittura la polizia. Fui portato in questura, per aver disturbato una cerimonia religiosa, e multato. Ma fu il peggiore affare che la categoria dei ciarlatani avesse potuto combinare, perché in quel momento decisi che avrei sempre lottato contro chiunque avesse inteso sfruttare un'arte nobile come l'illusionismo, per abbindolare il prossimo.

Il gioco di prestigio individuato da James Randi può essere eseguito con le seguenti modalità.

1. Chiedete a ciascuno dei vostri spettatori di scrivere su un foglietto il proprio nome e una breve frase a scelta.
2. Raccogliete tutti i foglietti ripiegati dagli spettatori e poneteli in ordine sparso sul tavolo.
3. Annunciate che, grazie alla mediazione del vostro *spirito-guida*, riuscirete a leggere il contenuto dei vari foglietti prima di aprirli.
4. Prendete uno dei foglietti e, senza aprirlo, dichiarate quale frase, secondo voi, è contenuta al suo interno, aggiungendo il nome di chi l'ha scritta.
5. Chiedete alla persona che avete nominato se ha scritto proprio la frase da voi pronunciata, ottenendo una risposta affermativa.
6. Aprite il foglietto (senza mostrarlo al pubblico...) e confermate che, in effetti, il suo contenuto coincide con quanto da voi predetto.
7. Prendete un altro foglietto e, anche questa volta, senza aprirlo, dichiarate quale frase, secondo voi, contiene e chi l'ha scritta.
8. Verificata anche l'esattezza di questa previsione, in base alle stesse modalità prima esposte, proseguite nell'esperimento, indovinando, uno dopo l'altro, il contenuto di tutti gli altri foglietti.

Per poter effettuare questa stupefacente performance, avete bisogno dell'aiuto di un compare, nascosto tra il pubblico. Al momento richiesto, questa persona deve scrivere sul proprio foglietto una frase concordata con voi in precedenza, oltre al proprio nome (ad esempio: «Ciao a tutti – Gino»). Poi, nel ripiegare il foglietto, dovrà fletterne un angolino, in modo che voi possiate riconoscerlo e prenderlo solo alla fine.

Dopo aver prelevato il primo foglietto, prima ancora di aprirlo, dovete dichiarare come suo contenuto quello stabilito con il vostro compare (quindi: «Ciao a tutti – Gino»). Subito dopo, dovete aprire quel foglietto e (con la scusa di verificare l'esattezza della vostra precedente previsione) leggere i dati in esso riportati (ad esempio: «Bella giornata – Mario»), tenendoli bene a mente.

Al passo successivo, dopo aver preso un secondo foglietto, dovete dichiarare come suo contenuto quello che avete appena letto (quindi: «Bella giornata – Mario»).

Proseguendo in questo modo (badando a prendere il foglietto del vostro compare solo alla fine), il gioco funziona automaticamente.

–	–	X
$P_{N-1}$	$\Leftrightarrow$	$F_{N-1}$
...	$\Leftrightarrow$	...
$P_5$	$\Leftrightarrow$	$F_4$
$P_4$	$\Leftrightarrow$	$F_3$
$P_3$	$\Leftrightarrow$	$F_2$
$P_2$	$\Leftrightarrow$	$F_1$
$P_1$	$\Leftrightarrow$	(dati concordati)
<b>Previsione</b>		<b>Foglietto</b>

Il meccanismo di questo trucco (pittoroso evidente, da quanto prima esposto) può essere formalizzato mettendo in corrispondenza binomiale l'insieme delle previsioni  $\{P_1, P_2, \dots, P_N\}$  con quello del contenuto dei foglietti:  $\{X, F_1, F_2, \dots, F_{N-1}\}$  ( $X =$  foglietto segnato), nel modo riportato nella seguente tabella.

**Spiegazione matematica del trucco**

Laureato in Matematica, Ennio dalla fine degli anni '70 svolge la professione di "giocolo", con l'intento di diffondere, tramite ogni possibile mezzo, il piacere creativo di giocare con la mente.



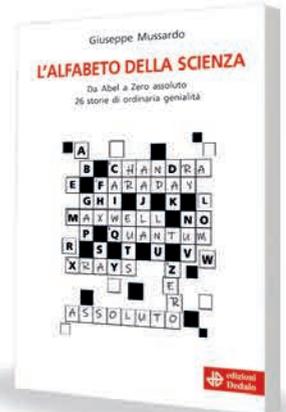
François Bricaire - Frédéric Saldmann

## Come affrontare le nuove epidemie

Giuseppe Mussardo

## L'alfabeto della scienza

Da Abel a Zero assoluto 26 storie di ordinaria genialità



Eleonora Polo

## L'isola che non c'è

La plastica negli oceani fra mito e realtà

Idan Ben-Barak

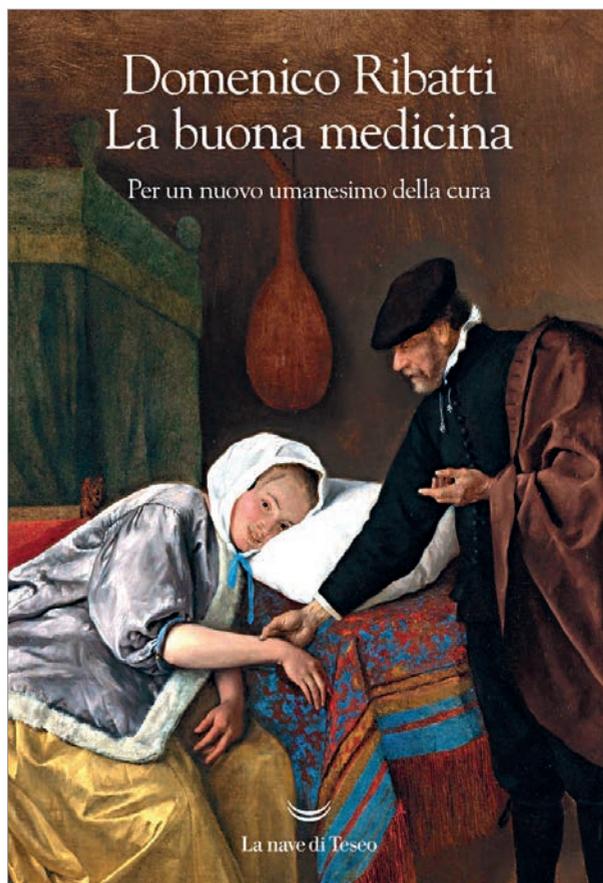
## Il regno invisibile dei microbi



R. Stephen Berry

## La freccia del tempo

Breve storia della termodinamica



## La buona medicina

Per un nuovo umanesimo della cura

di Domenico Ribatti

La Nave di Teseo, 2020

pp. 254, € 18,00

«Tu sei il medico giunto all'ora giusta, ed Apollo t'onora del suo lume. Bisogna che tu posi la tua mano delicata a curare la ferita» scrive Pindaro tra il VI e V secolo a.C. nella quarta *Pitica* dedicata al re Arcesilao e a Demofilo. La figura del medico, atteso dal paziente, che giunge a guarire o, quanto meno, a consolare e a portare quella luce che illumina il buio della sofferenza, è rappresentata con grande efficacia in questa breve e antica immagine. Il medico e il paziente, un binomio storico, antropologico e culturale fondativo nella tormentata vicissitudine umana.

Gli antichi Greci ci hanno lasciato pagine memorabili sulla purezza e sacralità, intese nel senso più profondo e laico del termine, di questo rapporto che, in alcuni passaggi degli scritti ippocratici, viene addirittura coniugato al duale, la modalità dell'amicizia profonda e dell'amore. Da una parte il malato, che nulla sa e

nulla può, bisognevole di tutto. Dall'altra il medico, che molto sa e può. Un rapporto intenso, segreto, confidenziale, tuttavia asimmetrico, che vincola due creature umane in un contesto di dolore e di speranza.

Che cosa è rimasto di una tale relazione nella medicina moderna, ridotta spesso alla dimensione di una branca affatto specialistica, asettica e impersonale nella sua attuale propensione tecnologica, pericolosamente soggetta a condizionamenti economici e di potere? A questi ardui interrogativi cerca di dare risposta Domenico Ribatti, tra i più illustri accademici italiani nell'ambito delle discipline anatomiche, noto in particolare per le sue fondamentali ricerche sull'angiogenesi, non nuovo a cimentarsi in profonde incursioni nel terreno dei rapporti tra sapere scientifico e cultura storico-umanistica.

Nel suo libro *La buona medicina*, scritto a un tempo con la mente e con il cuore, con lucidità e passione, con obiettività e coinvolgimento, in uno stile sempre limpido e incalzante, Ribatti ripercorre alcune tappe della storia del rapporto medico-paziente, cercando costantemente di immedesimarsi nella prospettiva e nelle aspettative di un'umanità sofferente. L'argomento, in sé complesso, è suddiviso in una serie di agili capitoli che mettono a fuoco alcune tematiche ritenute fondamentali dall'autore: il significato, o i significati, dei termini salute e malattia; i rapporti tra medicina e società; tra università, ricerca e formazione; l'epidemiologia; le medicine alternative; la pratica della psichiatria.

Notevole, in questo senso, la parte riguardante "I sistemi sanitari e la sanità pubblica", un inquietante resoconto sui pesanti limiti, inaccettabili per la loro ipocrisia, di alcune realtà organizzative tanto decantate quanto socialmente inefficaci. Di particolare interesse, il tema del "Fine vita e testamento biologico", argomento di estrema problematicità e delicatezza, che l'autore ha saputo trattare con raro equilibrio e rispetto delle parti. Ancora, la disamina sugli "Interessi economici e l'industria del farmaco", uno spaventoso spaccato su di una realtà terribile, di un cinismo intollerabile, che l'autore mette a nudo senza riserve. Il testo, pur denso di notizie, è scorrevole, molto aggiornato e documentato, costante nei rimandi e ricco di spunti di saggezza. Un libro di sicuro interesse per chiunque, laico o specialista, sia interessato ai rapidi mutamenti della medicina e agli inquietanti, pericolosi cambi di paradigma del rapporto tra il medico e il paziente.

Enrico Crivellato

## Emergenza energia Non abbiamo più tempo

di Nicola Armaroli

Edizioni Dedalo, 2020

pp. 96, € 11,50

Ci sono immagini che raccontano snodi cruciali della storia dello scorso secolo e di questi primi vent'anni del nuovo millennio: il fungo atomico causato da "Fat Man" su Nagasaki; il sorgere della Terra vista dalla Luna; l'impronta dello scarpone di Aldrin sulla superficie lunare; Kim Phúc, la bambina vietnamita che corre nuda, dopo che il napalm le ha distrutto i vestiti. L'elenco sarebbe lungo. Probabilmente, una delle fotografie più emblematiche dell'ultimo decennio è quella che ritrae una ragazzina, Greta Thunberg, che indossa un impermeabile giallo e ha accanto un cartello con la scritta "Skolstrejk för klimatet", sciopero scolastico per il clima. Greta e il movimento *Fridays For Future* sono riusciti a catalizzare l'attenzione dei più giovani – e non solo – su di una questione epocale, dibattuta già dalla fine degli anni '60 del secolo scorso: il cambiamento climatico causato dall'uomo.

Per mitigare le conseguenze dell'impatto umano sull'ambiente, negli anni a venire sarà necessario un cambio di paradigma, frutto di un radicale ripensamento delle modalità di produzione dell'energia che, negli ultimi due secoli, ha sostenuto e reso possibile il progresso della nostra società.

Nicola Armaroli, nel suo recentissimo libro *Emergenza energia*, conduce il lettore in un'attenta riflessione su come l'energia scandinava le nostre vite anche nelle azioni più semplici, al punto che senza di essa la quotidianità si ridurrebbe a un incubo. Ci rendiamo così conto che, per sostenere il tenore di vita occidentale, è come se avessimo al nostro servizio un numero di "schiavi energetici" che neppure gli imperatori dell'antica Roma potevano permettersi. Questa abbondanza che, erroneamente, tendiamo a dare per acquisita, è in realtà un gigante con i piedi d'argilla: si basa infatti sull'uso indiscriminato dei combustibili fossili, che tutti sappiamo non essere inesauribili, e sull'iniziale facile reperimento del petrolio dalle viscere della Terra.

Armaroli, sempre con un incedere molto coinvolgente, chiarisce che il costo economico e ambientale di tali fonti energetiche non è più soste-



nibile. La crisi economica che ha aperto il nuovo millennio, i conflitti che garantiscono i corridoi energetici hanno costi in vite umane altissimi. A ciò si aggiungano i migranti climatici che bussano sempre più numerosi alle nostre porte. Non abbiamo più tempo, come recita il sottotitolo del libro!

La transizione verso un diverso modo di reperire l'energia di cui necessita la nostra società non solo è possibile, ma sta già muovendo i suoi primi passi. Basti pensare al crescente contributo delle fonti rinnovabili alla produzione di energia elettrica, per esempio nei trasporti. Armaroli, però, non si ferma a questo, e sottolinea come occorra agire sinergicamente su più fronti per affrontare quello che è un processo complesso, ricco non solo di sfide scientifiche e tecnologiche, ma anche di scelte politiche, economiche e, finanche, personali (come le scelte dell'autore riguardo la propria casa e l'auto elettrica). «La scienza e la tecnologia non sono la soluzione a tutti i nostri problemi e occorre essere flessibili e farci trovare pronti anche a eventi e scenari inattesi», conclude Armaroli. Parole quanto mai appropriate oggi che siamo chiamati ad agire responsabilmente di fronte alla pandemia che incalza.

Sabrina Donghi

## Flower power

### Le piante e i loro diritti

di Alessandra Viola

Einaudi, 2020  
pp. 176, € 16,50

Ai robot abbiamo già riconosciuto diritti civili, molti prodotti dell'intelligenza artificiale sono in grado di convincerci di saper provare emozioni e dolore, e ci arroveliamo sull'etica e l'estetica della realtà aumentata. Ma che ne è invece di tutte quelle creature che nella realtà "tradizionale" frequentiamo ogni giorno della nostra vita da quando esistiamo su questo pianeta?

Al libro di Alessandra Viola, *Flower Power*, si giunge come inciampando, perché la riflessione sui diritti delle piante spunta come una radice di quercia dal marciapiede e ti fa perdere l'equilibrio mentre persegui le magnifiche sorti e progressive.

Dove stavamo guardando finora per non esserci accorti che loro erano lì, che sono sempre state e resteranno lì, sopravvivendo a noi e ai nostri sforzi di dominio antropocentrico? Alberi, fiori, semi, boschi, interi ecosistemi naturali sono forme viventi il cui riconoscimento di diritti è ormai indispensabile. Astrattismi? Per niente.

Il diritto di un seme a evolversi in maniera naturale ha tutto a che vedere con le nostre scelte alimentari quotidiane. Definire "biocidio" l'arbitraria uccisione di una pianta coincide con il prendere posizione contro ogni forma di deforestazione selvaggia o, per non andare fuori città, contestare quel consumo selvaggio di suolo che sacrifica superfici di parchi e giardini urbani per farne parcheggi o palazzoni.

Secondo la tesi del libro non è soltanto giusto iniziare a lavorare per una Dichiarazione universale dei diritti delle piante, ma è quanto mai urgente, «perché c'è in gioco la nostra stessa sopravvivenza», come spiega chiaramente l'autrice.

La provocazione con cui Alessandra Viola apre il libro è incendiaria. Letteralmente. Le se-

quenze delle fiamme che divorano la cattedrale di Notre-Dame sono impresse nella mente di tutti noi: un emblema del genio occidentale e della cristianità è andato in fumo ed è stato proposto di acconsentire al taglio di 2000 querce secolari per ricostruire fedelmente il tetto di questo massimo monumento nazionale. In Francia esiste anche una legislazione ambientale che prevede la tutela di boschi, come la mettiamo? È davvero questa la via sensata per riparare Notre-Dame?

La giornalista e divulgatrice scientifica compie un lavoro rigoroso e allo stesso tempo estroso con l'obiettivo di fornirci i più indispensabili elementi di

conoscenza di cosa è una pianta, attingendo alle più importanti scoperte scientifiche di neurobiologia vegetale. Ancora, l'autrice ci accompagna nell'esplorazione dei "diritti della natura" presentandocene alcuni custodi: paladini *de facto*, come le tante popolazioni indigene la cui identità culturale è indissolubilmente legata al contesto naturale o guerrieri solitari per necessità, come Julia che ha vissuto ben 738 giorni consecutivi su una sequoia per non permettere l'abbattimento di altri alberi per la produzione di legname.

Secondo l'autrice, il tempo per una Carta universale dei diritti delle piante è giunto. Nel libro

ne è proposta una ideale, figlia delle Dichiarazioni più rilevanti ritenute baluardi di emancipazione. Una bozza intorno alla quale è ora di sedersi perché, come spiega Viola, «la strada è tracciata e non è più una questione di se, ma di quando».

Degli 8 articoli di cui si compone il documento proposto, l'ultimo è spiazzante: «Ogni pianta ha il diritto, tramite rappresentanza legale, di difendersi da azioni lesive dei suoi diritti. Ogni pianta ha il diritto al risarcimento dei danni subiti». Ogni singolo vegetale, anche il basilico che furoreggia sul mio balcone, chiede così di essere difeso e non può sussistere un diritto se non esiste chi possa essere in grado di farlo rispettare. Tocca a me e tocca a te. Anche se non hai il pollice verde.

Rosy Matrangolo



## Intorno all'idea matematica di curva

### Una introduzione storica

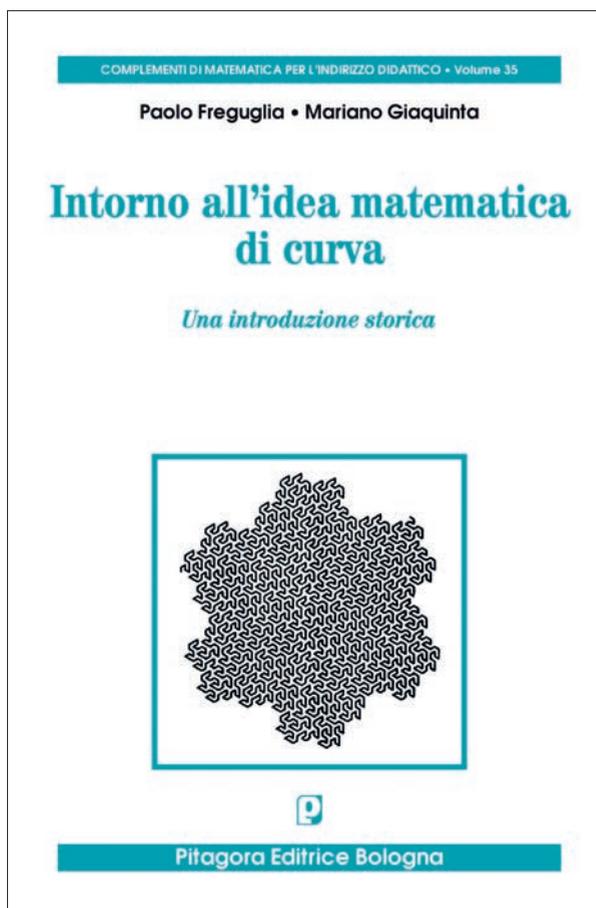
di Paolo Freguglia e Mariano Giaquinta  
 Pitagora, 2020  
 pp. 268, € 24,00

Comincio con un compito facile, presentando assai brevemente i due autori. Paolo Freguglia è noto al pubblico degli appassionati di storia della matematica (non solo italiano) per le tante sue opere, soprattutto di ricerca ma anche di divulgazione. Attualmente è Presidente della Società Italiana di Storia della Matematica. Mariano Giaquinta è stato docente (ora emerito) presso la Scuola Normale Superiore di Pisa; analista, vincitore di premi di assoluto prestigio (Accademia dei Licei e Fondazione von Humboldt).

E passo al compito difficile: presentare brevemente questa storia dettagliata, coinvolgente e appassionante. Plaudo alla geniale idea di dedicare un apposito studio storico all'evoluzione di uno degli oggetti matematici più conosciuti, ma proprio per questo a volte dati per scontati: le curve.

Non si può che iniziare dalle origini, le curve presso i Greci (Eudosso, Archimede, Apollonio), dunque con metodi esclusivamente sintetici. Si passa poi al metodo analitico, con Descartes e Fermat, la questione delle quadrature e delle rettificazioni, il metodo degli indivisibili di Cavalieri. Si giunge al calcolo, con Leibniz e Newton, grazie ai quali lo studio delle curve assume dimensioni diverse, profondamente tecniche; ed Eulero, che studia il moto dei corpi, servendosi appunto degli strumenti del neonato calcolo. Si perviene all'idea di equazioni differenziali, chiarendo concetti come le funzioni esponenziali, logaritmiche, funzioni circolari, moto armonico, fino alla definizione di una nuova idea di curva. Nascono le curve differenziabili, il che comporta strumenti del tutto nuovi in geometria.

Seguono Lagrange, Newton, Huygens, fino alla definizione delle curve isocrona e tautocrona. Molto dotto e convincente il passaggio alle curve continue, grazie agli studi sui numeri reali di Weierstrass, Méray, Heine, Cantor e Dedekind.



Si presentano le cosiddette curve di Jordan e la nuova rivoluzionaria idea di dimensione.

Un capitolo è dedicato a quel magnifico periodo del XIX secolo nel quale ci fu uno sviluppo straordinario degli studi anche generali e critici sulla geometria delle trasformazioni, sulla geometria algebrica e quella differenziale. Fino ad arrivare alla nuova concezione delle curve algebriche.

Credo che qualsiasi persona amante o solo curiosa dell'avventura scientifica della matematica avrà un profondo beneficio culturale dalla lettura di questo libro. Penso che alcuni di questi capitoli potrebbero essere adatti a letture comuni in aula, docente e allievi all'unisono, come discussione e approfondimento; ne nascerebbe una bella azione didattica, viva, interessante, profonda. So per certo che questo è uno degli obiettivi di base sui quali si è costruita questa splendida storia delle curve in geometria.

Bruno D'Amore

# Biglietto di sola andata

di Giuseppe Mussardo

L'aereo si era mosso. «Finalmente», pensò. Si girò a guardare Marianne, i bambini. Il bimotore della Scandinavian Airlines iniziò a rullare sulla pista, il rumore delle eliche salì di tono: si sporse leggermente fuori dal posto e, in fondo al corridoio, vide la porta della cabina semi-aperta e il pilota alle prese con la radio, sicuramente per le ultime comunicazioni con la torre di controllo. Era passata l'hostess a dare un'ultima occhiata ai passeggeri, si era raccomandata che i bambini allacciassero la cintura. Doveva mancare veramente poco al decollo.

Rivolse di nuovo lo sguardo alla moglie, le prese la mano: Marianne sembrava esausta, non aveva proferito un suono per tutta la mattina, e da quando avevano lasciato l'Italia avevano scambiato sì e no dieci parole. L'ultimo litigio in casa di sua sorella Anna, a Roma, due giorni prima, aveva lasciato il segno e quella notte appena passata in hotel, vicino l'aeroporto, era stata una nottataccia. Marianne si era girata e rigirata nel letto, in preda allo sconforto per quella loro fuga improvvisa e perché, pur essendo a Stoccolma, non aveva potuto vedere i suoi, neanche scambiare una telefonata, figuriamoci un abbraccio. «Questione di sicurezza» aveva provato a dirle Bruno con grande affetto, come sempre molto protettivo, «non possiamo, veramente...». Lei gli aveva risposto con quel suo silenzio assordante e con quello sguardo perso che ormai aveva imparato a conoscere.

Mentre l'aereo accelerava, Bruno lanciò un'occhiata in direzione del finestrino, dove il piccolo Gil aveva il naso schiacciato contro il vetro e si teneva le manine intorno gli occhi per proteggersi dal sole: fortuna che era sempre stato un bambino allegro, ora sembrava tutto preso da quella improvvisa variazione di programma. «Non torniamo in Inghilterra, continuiamo la nostra vacanza, sei contento?». Certo che era contento! Avrebbe

sicuramente conosciuto altri cuginetti e, come aveva fatto nelle settimane scorse sulle spiagge del Circeo o nei giardini vicino casa della zia a Roma, avrebbero giocato tutti assieme, lui, i suoi fratellini Tito e Antonio e i cuginetti.

Il sole era a filo sulla pista, da lontano si vedeva il mare. Bruno volse di nuovo lo sguardo a Marianne, gli sembrò che avesse gli occhi chiusi, non era sicuro però se dormisse o piangesse. Accennò un gesto di carezza, le spostò una ciocca di capelli. La donna non si mosse. Posò lo sguardo su quel viso tanto dolce, su quelle labbra così belle; l'aveva amata sin dal primo momento in cui l'aveva incontrata a Parigi, in quel caffè lungo il boulevard du Montparnasse dove la sera si ballava. «Tenera è la notte». Era stata una serata bellissima, prima di presentarsi si erano cercati a lungo con lo sguardo sulla pista da ballo, lui poi l'aveva avvicinata chiedendole se fosse francese, lei lo aveva guardato stralunata e, tra la musica assordante, gli aveva gridato «*Je suis de Stockholm, je suis suédois*». Avevano passeggiato tutta la notte sul lungosenna, mano nella mano. Era stato nel giugno del 1936, secoli fa... Lui era a Parigi per lavorare con i Joliot-Curie, lei per studiare letteratura. Gli amici lo avevano punzecchiato: «Ecco l'italiano playboy che conquista la svedese, chi sarà la prossima?». Non c'era stata nessuna prossima. Non si erano più lasciati...

L'aereo ebbe una scossa, si riprese e puntò decisamente il muso verso l'alto. «Addio Stoccolma», pensò. Poi, appoggiando il capo al sedile, si addormentò di colpo e iniziò a sognare.

Nel sogno gli sembrò di sentire la voce di Henry Arnold, il capo della sicurezza di Harwell, là dove i britannici volevano fare la loro bomba atomica. Era, come al solito, spiacevole e gli rimbombava nella testa, incutendogli una certa soggezione. Tutto era nato con quel maledetto "caso Fuchs",

uno scandalo che era finito sui giornali di mezzo mondo quando avevano arrestato Klaus Fuchs con l'accusa di aver passato ai sovietici tutti i segreti atomici. Lo avevano processato e condannato a 15 anni di carcere. Lo conosceva Fuchs, certo che lo conosceva! Avevano lavorato assieme a Harwell, porca miseria! Era così che era cominciata la caccia alle streghe, era allora che gli avevano fatto il terzo grado. Cos'era, maggio o giugno 1950? Solo pochi mesi fa... Nel sogno gli riapparve quella squallida stanza al terzo piano, quel tavolo dietro al quale sedeva Arnold, che lo guardava fisso negli occhi, insieme ad altri agenti dei servizi segreti. Su Fuchs gli sembrava avesse risposto qualcosa come «Fuchs era un ottimo scienziato, tutti lo conoscevano come una persona per bene».

Aprì gli occhi, guardò fuori dal finestrino, dove era ancora appiccicato Gil, come incantato: si vedeva la costa, tutta frastagliata e, alle spalle, foreste infinite di abeti, aceri e olmi. La stanchezza ebbe di nuovo il sopravvento, si assopì al ricordo di quando, aprendo un dossier, Arnold gli aveva chiesto: «Dr. Pontecorvo, ha per caso delle simpatie comuniste? O qualcuno della sua famiglia, forse?» e gli tornò in mente che era stato costretto ad ammettere, con un certo imbarazzo, che sì, era da tempo che nutriva simpatie per una certa giustizia sociale e se questo si chiamava comunismo, tanto meglio. Per quanto riguardava i suoi parenti, suo cugino Emilio e il suo amato fratello Gillo, se proprio lo voleva sapere, erano entrambi membri del partito comunista italiano. Rabbrividì al pensiero del gelo che era calato improvvisamente nella sala, l'incrocio di sguardi di quegli uomini che aveva di fronte, il lunghissimo «I see...» di Arnold. Non l'avevano incriminato, non l'avevano licenziato, ma nel compenso gli avevano tolto la "security clearance". Era stato schedato, marchiato e isolato, al laboratorio nessuno gli aveva rivolto più la parola.

Il viso gli si distese quando gli venne in mente la vacanza appena fatta in Italia: era stata un toccasana, tutto quell'affetto e calore da parte di Gillo, le loro corse sulla spiaggia, la pesca subacquea, le cene sulla spiaggia al Circeo, i ricordi di quando, da piccoli, si nascondevano sull'albero di nespole, le discussioni sui massimi sistemi, sulla guerra e sul fascismo, sulla ricostruzione, sul futuro...

Forse anche Marianne era stata trascinata da quell'atmosfera così... così italiana! Non rideva for-



se anche lei ascoltando Gillo che imitava la zia o mentre raccontava lo scherzo che aveva fatto al milionario a cui dava lezioni di tennis? Ma quello che era successo dopo, era accaduto veramente o era solo un sogno? Gli tornò in mente la prima pagina del *Corriere della Sera*, la citazione in giudizio del governo degli Stati Uniti per quel maledetto brevetto sui neutroni lenti che aveva fatto con Fermi, Rasetti e il resto del gruppo, quella visita improvvisa di Emilio, che era venuto appositamente da Roma per metterlo in allerta che, qualora fosse tornato in Inghilterra, lo aspettava una sorte simile a quella di Fuchs... Erano stati un sogno tutti quei giorni concitati, drammatici? Era un sogno quella voce calma di Emilio che gli diceva che l'unico posto al mondo dove poteva essere in pace con se stesso era l'Unione Sovietica? Era il Paese dell'avvenire, gli diceva, dove poteva dedicarsi alla fisica e dare voce alla sua passione politica, era il Paese dove stava nascendo l'uomo nuovo, il Paese del futuro.

In quel suo strano dormiveglia pensò che era stato tutto un sogno. Sentì lo stridore dei freni, avvertì lo spasmo allo stomaco per la brusca decelerata. Dopo una lunga corsa, l'aereo finalmente si fermò. Vide il pilota lasciare la cabina e avvicinarsi a lui. Gli aveva mormorato qualcosa in inglese e si era allontanato. Era ancora un po' intorpidito ma, ora che ci pensava, era sicuro che gli avesse detto: «Dr. Pontecorvo, benvenuto nel Paese dell'avvenire».

## Il gatto di Nazca

Monica Marelli



Le misteriose incisioni sul terreno (geoglifi) note come linee di Nazca (Perù) non smettono di stupire.

Dopo aver mostrato le stilizzazioni di un colibrì, una scimmia, un'orca e perfino (secondo qualcuno) un astronauta, è di pochi giorni fa la notizia di una nuova scoperta: la figura di un gatto.

Secondo gli archeologi che l'hanno individuata, l'incisione ha un'età che varia dal 200 a.C. al 100 d.C. Per collocarla temporalmente hanno confrontato i disegni che ornavano le stoffe e il vasellame dell'antica civiltà Paracas, nei quali compaiono persone, uccelli e gatti che sono decisamente confrontabili con quel... gattone di pietra e polvere.

Il geoglifo felino è emerso durante i lavori per migliorare l'accessibilità a una delle colline da cui si gode di un nuovo punto di osservazione per gli altri geoglifi. Il ricercatore peruviano Johny Isla, capo archeologo, ha affermato che ormai è raro scoprire nuove figure, anche se è molto probabile che ve ne siano altre ancora sepolte. Inoltre ha spiegato che il gatto era poco visibile e stava addirittura scomparendo a causa dell'erosione naturale a cui è sottoposto il fianco della collina abbastanza ripido su cui è inciso. Il micio è lungo 37 metri e il "tratto" che lo definisce ha una larghezza che varia tra i 30 e i 40 centimetri.

Ma qual è il segreto di queste linee tracciate su un altopiano che occupa circa 80 km tra le città di Palpa e Nazca e che dal 1994 è un sito UNESCO? Fino a oggi sono stati scoperti più di 800 disegni, animali stilizzati come balena, pappagallo, lucertola, condor, ecc. Il primo a studiarli fu l'archeologo peruviano Manuel Toribio Mejía Xesspe nel 1926 ma solo negli anni '30, con i primi voli commerciali, ci si rese conto grazie alla visione aerea di cosa rappresentassero le linee. Sono state realizzate rimuovendo rocce e uno strato di terreno. Le pietre che coprono il deserto infatti sono ossidate dall'ossigeno presente naturalmente nell'atmosfera e sono di color ruggine: quando vengono rimosse lasciano esposta la sabbia sottostante più chiara. E dato che in quella zona pio-



© OFICINA DE COMUNICACIÓN E IMAGEN - Ministero della Cultura, Perù

ve pochissimo e i venti sono praticamente assenti, i disegni sono rimasti intatti per secoli.

E c'è un altro mistero che merita di essere considerato: come hanno fatto a realizzare disegni così ben proporzionati? Le linee infatti sono lunghe chilometri e gli "errori" sono impercettibili. Secondo gli studiosi, gli antichi conoscevano bene la geometria e sapevano come riprodurre uno schema in grande partendo da uno piccolo con il metodo del reticolato, usando delle corde.

Ma veniamo al cuore del mistero: perché disegnare sul terreno enormi animali? Dopo le ipotesi astronomiche smentite (sembrava che alcune figure potessero essere in relazione ai movimenti apparenti delle costellazioni durante l'anno), quelle religiose (i disegni indicavano agli Dei i luoghi terreni dove far ritorno) e quelle idrauliche (erano schemi che indicavano flussi d'acqua sotterranei), ultimamente la spiegazione più accettata è quella della rappresentazione degli animali per compiacere gli Dei durante le danze della pioggia, un elemento naturale troppo scarso per assicurare la sopravvivenza della civiltà. Tutto chiarito, dunque? Purtroppo no: nessuno ha ancora stabilito con certezza il significato delle figure geometriche come triangoli e linee, che superano in numero le rappresentazioni del mondo animale.

Monica, fisica, si occupa di divulgazione scientifica ed è giornalista freelance.

## Deep Vents: le meraviglie degli abissi sul proprio tavolo

Marco Signore



La scoperta dei camini idrotermali è una delle più recenti nell'ambito della biologia marina: la prima pubblicazione sulla vita attorno a queste incredibili strutture si è vista solo nel 1977. Una più sistematica esplorazione con sottomarini e ROV (*Remotely Operated Vehicle*, veicoli operati a distanza) è iniziata due anni dopo, anche grazie all'*Alvin* – un veicolo pilotato da esplorazione del mare profondo – e alla sua prima donna pilota, Cindy Lee Van Dover. Oggi i camini idrotermali godono di una nuova ondata di interesse perché sono considerati l'ambiente dove la vita ebbe origine sulla Terra, e se ne ipotizza l'esistenza anche su Europa, un satellite di Giove; se così fosse, attorno a questi camini si potrebbero trovare i primi organismi alieni. Infatti, i camini idrotermali sono una vera e propria oasi di vita nei deserti degli abissi marini: attorno a queste enormi strutture geologiche ricoperte di minerali si aggregano decine e decine di specie viventi scoperte da pochissimo, e se ne scoprono di nuove anno dopo anno.

Un ambiente così peculiare ci ha messo tuttavia un bel po' di tempo per far breccia nel mondo dei giochi da tavolo, e solo alla fine di quest'estate è uscito *Deep Vents*, un gioco per 2-4 persone ideato da T. Alex Davis e Ryan Laukat e pubblicato dalla Red Raven. Il gioco è indipendente dalla lingua, eccetto il regolamento, perché le sue parti non riportano alcun testo, ma solo simboli e qualche numero.

In *Deep Vents* ciascun giocatore parte con un camino idrotermale, rappresentato da una tessera esagonale, e degli *archaea* (nel gioco piccoli cubetti in plastica), forse le prime forme di vita unicellulari comparse sulla Terra, che rappresentano la valuta del gioco. Questi *archaea* prolifereranno sui camini idrotermali e nell'ecosistema circostante, che si costruirà in soli otto turni di gioco, acquistando e aggiungendo all'ambiente nuove tessere: queste rappresentano non solo altri possibili camini come i *white* o i *black smoker*, ma anche forme di vita tipiche, come i giganteschi vermi *Riftia*, le meduse luminose o i massicci calamari giganti.



Molti di questi animali, quali il gasteropode *Chrysomallon* o il granchio *Kiwa*, forniscono difese ai camini, rappresentate da conchiglie in resina, per evitare di perdere i preziosi *archaea* a causa di eventi o attacchi degli avversari.

Alla fine dell'ottavo turno di gioco, la partita termina, e chi possiede più *archaea* è dichiarato vincitore. *Deep Vents* è un gioco che rasenta l'astratto ma in cui le tessere, gli animali e i processi rappresentati sono molto vicini alla realtà che conosciamo dall'esplorazione degli abissi. *Deep Vents* è anche un'occasione per scoprire animali al limite della fantascienza che vivono nei nostri mari.

Le strategie per la vittoria sono molteplici: possiamo basarci sulla difesa a oltranza, sviluppare comunità bioluminescenti, o ancora predare senza pietà i camini degli avversari. Le illustrazioni non sono sicuramente disegni naturalistici, ma rendono molto bene i tratti base degli organismi rappresentati, e i materiali sono davvero ottimi (le conchiglie in resina soprattutto). Forse il difetto sta nella breve durata di una partita, soli otto turni, ma anche questo aspetto è ben congegnato (i camini idrotermali spesso durano pochissimo in natura). *Deep Vents* è un bel titolo e soprattutto, al momento, è l'unico che provi a evocare uno degli ecosistemi più affascinanti e alieni del nostro meraviglioso pianeta.

Marco, laureato in Scienze Naturali, ha un PhD all'Università di Bristol in paleobiologia e lavora presso la Stazione Zoologica di Napoli "Anton Dohrn".

# SOGNO O SON DESTO?

JEFF C. HALL E MICHAEL ROSBASH SI CONOBBERO NEL 1975 ALLA BRANDEIS UNIVERSITY E DIVENTARONO SUBITO AMICI.

...E QUESTO È IL PROFESSOR ROSBASH.

INCREDIBILE, ANCHE LEI È UN FAN DEI RED SOX?



OLTRE AL BASEBALL, TRA LE VARIE PASSIONI CHE LI UNIVANO C'ERA IL BASKET...

ERA STASERA L'APPUNTAMENTO CON QUELLA RAGAZZA?

OH SÌ, PASSO A PRENDERLA PER LE 21.

... AVEVANO L'ABITUDINE DI GIOCARE CON COLLEGI, STUDENTI E AMICI NELLA PALESTRA DELL'UNIVERSITÀ.



E DICCI ALLORA, DOVE LA PORTERAI?

PFF, SAI INVECE COME CORTEGGIA LA SUA PRESCELTA IL MOSCERINO DELLA FRUTTA?

MA DAI! LE SAI DAVVERO TUTTE SU QUESTI MOSCERINI!

PRIMA A CENA E POI A TEATRO. HO DUE BIGLIETTI PER IL REAGLE MUSIC THEATRE...

WOW!

IN PRATICA, INSEGUE LA FEMMINA E LE CANTA UNA SERENATA CON LA VIBRAZIONE DELLE ALI!



SAI, QUANDO ERO A PASADENA, HO INIZIATO A STUDIARE IL CICLO SONNO-VEGLIA IN QUESTI MOSCERINI, È DAVVERO INTERESSANTE!

È ORA CHE QUALCUNO LO SCOPRA MICHAEL!

SAI, PENSO CHE POTREMMO RIUSCIRCI, NEL NOSTRO LABORATORIO! DOVREMMO CLONARE IL GENE DI QUESTO MOSCERINO. IO SO COME CLONARE I GENI, E TU CONOSCI TUTTO SUI MOSCERINI DELLA FRUTTA!

BEH, EFFETTIVAMENTE È UN CAMPO ANCORA POCO CONOSCIUTO. SAPPIAMO CHE NELL'ORGANISMO C'È UN OROLOGIO CHE LO REGOLA, MA NON ABBIAMO IDEA DI COME FUNZIONI!



NEL 1984 HALL E ROSBASH RIUSCIRONO A ISOLARE IL GENE *PERIOD* E SCOPRIRONO CHE LA PROTEINA *PER*, CODIFICATA DAL GENE *PERIOD*, SI ACCUMULAVA DURANTE LA NOTTE E VENIVA RILASCIATA DURANTE IL GIORNO, SPIEGANDO COSÌ I FINI MECCANISMI CHE REGOLANO L'ATTIVITÀ DI QUESTO GENE. LE FUNZIONI INTERNE DELL'OROLOGIO BIOLOGICO APPARIVANO PIÙ CHIARE, MA ERA SOLO L'INIZIO...



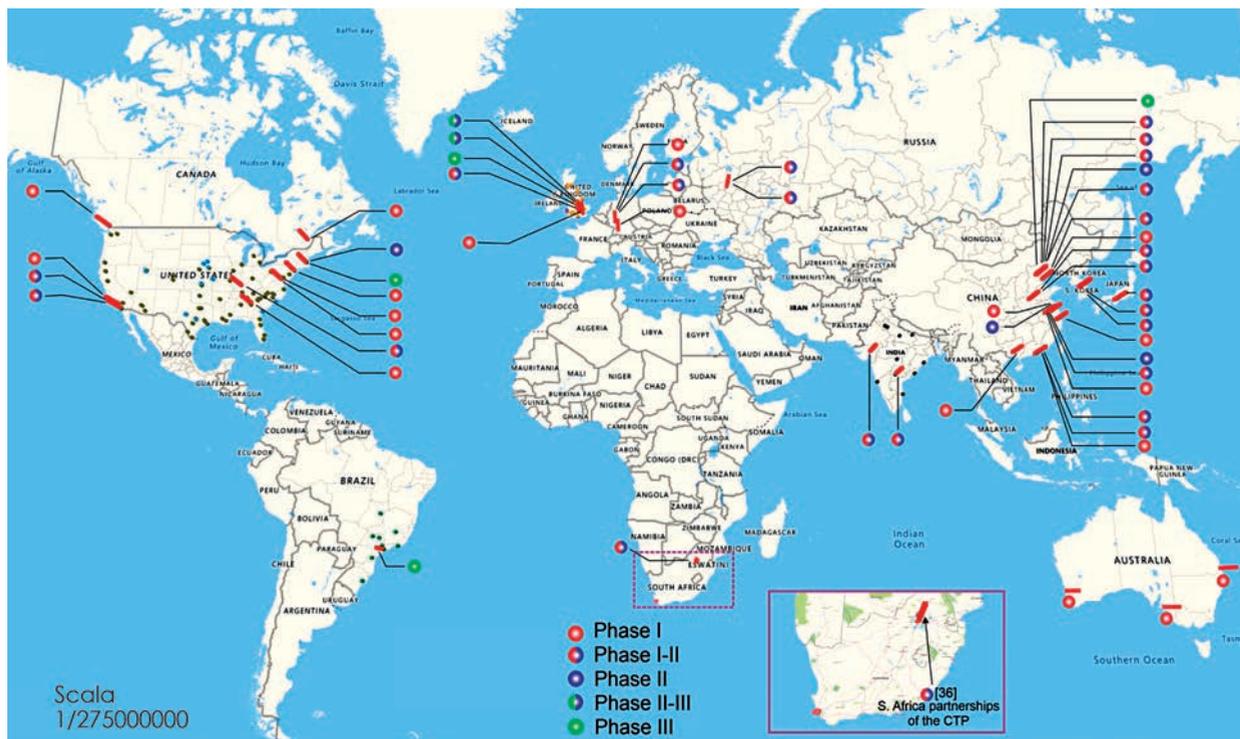
FU SCOPERTO CHE LO STESSO GENE È PRESENTE ANCHE NEGLI ESSERI UMANI. L'ESITO DELLA RICERCA DEI DUE SCIENZIATI ERA DUNQUE APPLICABILE AGLI STUDI SUI DISORDINI DEL SONNO.



LE SCOPERTE COMPIUTE DA QUESTI PIONIERI DELLA SCIENZA SONO DI GRANDE IMPORTANZA PER LO STUDIO DI FENOMENI COME IL JET-LAG E L'INSORGENZA DI MALATTIE DOVUTE A UNO SQUILIBRIO DEL RITMO SONNO-VEGLIA.



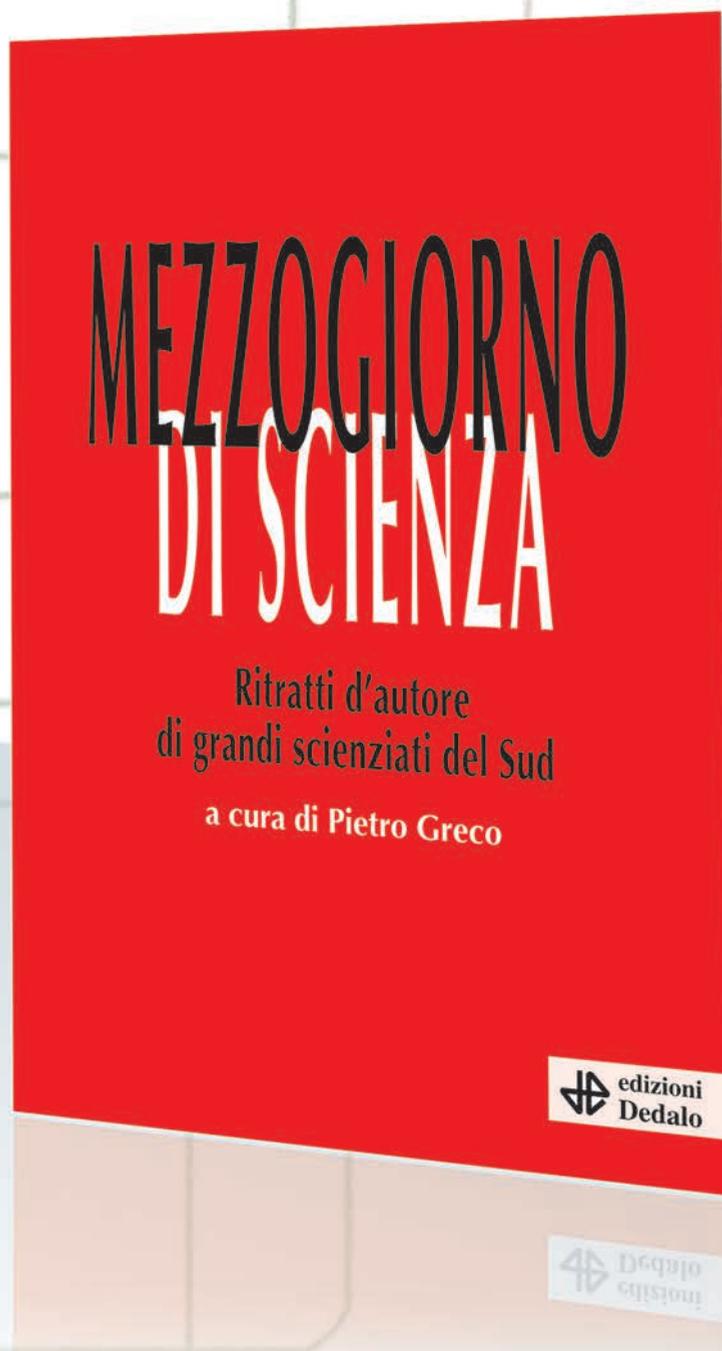
## Lo sviluppo dei vaccini nel mondo



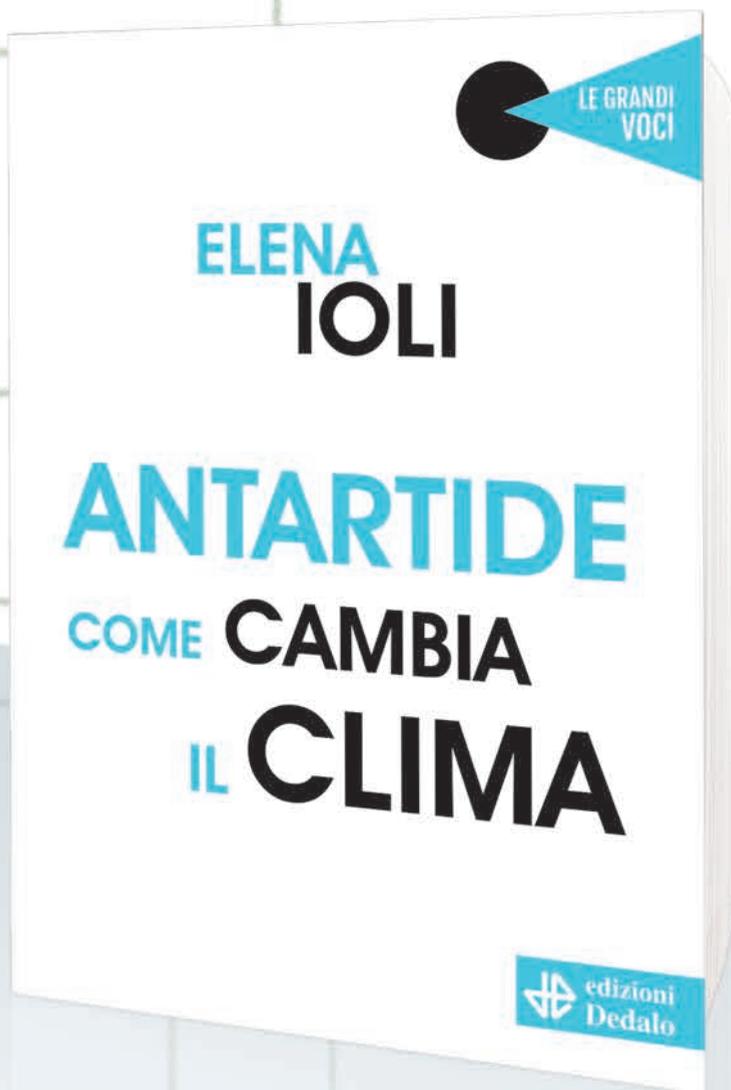
Distribuzione mondiale delle sperimentazioni cliniche dei vaccini contro il virus SARS-CoV-2 responsabile della malattia Covid-19. Le sperimentazioni sono rappresentate in base alla fase di avanzamento dei test dai cerchietti colorati in rosso, blu o verde (o da combinazioni di questi colori nelle fasi intermedie). Le barre rosse indicano dove le sperimentazioni vengono coordinate. Infine i pallini rappresentano le sedi in cui i volontari vengono accolti e controllati e sono colorati a seconda dell'azienda o dell'ente responsabile della sperimentazione. Sulla mappa sono presenti esclusivamente le sperimentazioni che vengono effettuate in più di 5 sedi.



Fonte: Reco *et al.*, "Current Clinical Trials Protocols and the Global Effort for Immunization against SARS-CoV-2", *Vaccines*, 2020.



Molti illustri scienziati degli ultimi due secoli sono nati nel Mezzogiorno, da Dulbecco a Majorana: la loro genialità è emblematica di un potenziale scientifico spesso dimenticato.



Una missione in Antartide, una spedizione internazionale di donne scienziate per studiare il clima e salvare il nostro pianeta: questo e molto altro in un libro che fa il punto sull'emergenza climatica e racconta una storia incredibile.

[www.edizionidedalo.it](http://www.edizionidedalo.it)

Seguici anche su

