

Che cosa ha ucciso davvero i dinosauri?



Febbraio 2016

€ 4,50

Le Scienze

www.lescienze.it

edizione italiana di Scientific American

L'era della disinformazione

Come l'espansione
dei social network
favorisce la diffusione
incontrollata
di informazioni
false e teorie
del complotto

Fisica

Il fenomeno dell'entanglement
e la descrizione quantistica dello spazio-tempo

Medicina

Sonde microscopiche per formulare
diagnosi in pochi minuti

POSTE ITALIANE SPED. IN A.P. - D.L. 353/2003 CONV. L. 46/2004, ART. 1, C. 1, DCB - ROMA - RIVISTA MENSILE - NUMERO 570



Pink Lady®

LA MELA CHE COLTIVA I SUOI VALORI

Portata in Italia dallo slancio collettivo di produttori appassionati, la mela Pink Lady® è l'avventura di donne e uomini riuniti in un'associazione senza scopo di lucro e legati dagli stessi valori. Rispetto del lavoro dell'uomo. Rispetto del tempo. Rispetto della terra. Questi valori sono alla base di tutte le scelte e di tutte le azioni e costituiscono il terreno fertile dal quale nasce una mela straordinaria.



molto più di una mela



COLTIVARE IL RISPETTO DELLA TERRA

Riconoscente alla terra che la nutre e desiderosa di proteggere il suo ambiente, la mela Pink Lady® matura nei migliori terreni, in frutteti a misura d'uomo. Il suo sistema di produzione preserva le risorse naturali e si ispira alle tradizioni, per valorizzare un modello virtuoso di produzione agricola che integra la lotta contro lo spreco alimentare e la riduzione dei rifiuti.

- 1,8 ha: dimensione media dei frutteti per produttore
- Impiego di predatori naturali, introduzione di alveari durante la fioritura...
- Il 100% della produzione (esclusi gli scarti) è destinato al consumo alimentare (fresco o industriale) per evitare gli sprechi
- Il 100% dei centri di condizionamento ha sviluppato programmi di riduzione di energia, utilizzo degli imballaggi in cartone e scarti della frutta

bugatti

THE EUROPEAN BRAND

RIVENDITORE BUGATTI

PRANDINA ABBIGLIAMENTO - Schio (VI)
MAGAZZINI BERTON - Bolzano Vicentino (VI)
MODA CENTER - Signoressa (TV)
ARTENI - Tavagnacco (UD)
TOMMASINI SPA - S. Maria di Sala (VE)
FERRACIN - Refrontolo (TV)
ADRIAN PAM - Brescia (BS)
COITER - Anzano del Parco (CO)
NEW CITY - Castelverde (CR)
VERRI - Granarolo d' Emilia (BO)
CHOISTRI - Sesto Fiorentino (FI)
MARIO CERVI ABBIGLIAMENTO - Sassuolo (MO)
GUIDO MENCARI - Capannori (LU)
GIORGIA BOUTIQUE - Fiorina (R.S.M.)
PUNTO BLU - S. Pietro di Legnago (VR)
IL QUADRANTE - Bussolengo (VR)

With the high-tech
functionality of



MENSWEAR | WOMENSWEAR | LEATHERWEAR | SHOES | BAGS | ACCESSORIES | HOMEWEAR | UNDERWEAR | BUGATTI-FASHION.COM



La grande mole di dati sui social network permette di studiare la diffusione della disinformazione con un dettaglio senza precedenti, ottenendo risultati inquietanti: fermare una notizia falsa è impossibile. (Immagine: Anton Balazh/Shutterstock)

Febbraio 2016 numero 570

30 INTERNET L'era della (dis)informazione

di Walter Quattrocchi

L'espansione dei social media ha un lato oscuro, ovvero la diffusione pervasiva e senza freni di informazioni false e teorie del complotto, che potrebbe mettere a rischio la società



PALEONTOLOGIA

40 Che cosa uccise i dinosauri?

di Stephen Brusatte

L'impatto con l'asteroide fu terribile. Ma avvenne anche nel peggior momento possibile

FISICA TEORICA

46 Entanglement quantistico e geometria

di Juan Martín Maldacena

Lo strano fenomeno quantistico che tanto inquietava Einstein potrebbe spiegare la continuità dello spazio e del tempo

FISICA

54 Dov'è «qui»?

di George Musser

La nostra impressione che l'universo sia una distesa ordinata in cui gli eventi avvengono in punti di uno spazio assoluto è un'illusione

ASTRONOMIA

58 La guerra dei telescopi

di Katie Worth

Vecchi rancori mettono a repentaglio gli enormi telescopi necessari per una nuova epoca di scoperte astronomiche

MEDICINA

64 Genomica per la comunità

di Kevin A. Strauss

Una clinica pediatrica creata e finanziata da Amish e Menoniti dimostra che la ricerca genetica hi-tech può essere usata già oggi per prevenire le malattie

MEDICINA

72 Rivelatore di malattie

di Shana O. Kelley

Minuscole sonde diagnosticano infezioni in 20 minuti abbattendo i tempi di attesa dei risultati e salvando vite umane

MICROBIOLOGIA

76 Gli invisibili compagni delle radici

di Paola Bonfante, Elisa Dell'Aglia e Veronica Volpe

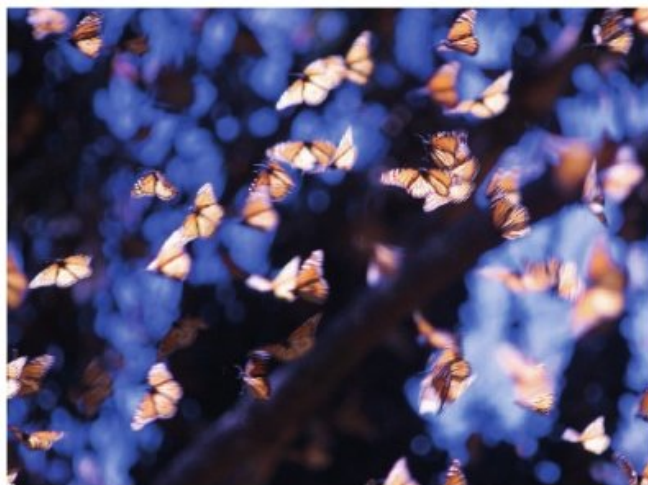
Da milioni di anni le piante affrontano le difficoltà dell'ambiente unendo le forze con altri organismi del suolo ora al centro dell'attenzione

ETOLOGIA

82 I babuini superano il test

di Joel Fagot e Anaïs Maugard

Bravissimi a individuare analogie, capaci di riconoscere la propria ignoranza, meno inclini a riflettere se stressati. È il ritratto dei babuini proposto da un nuovo metodo di ricerca



19



21



97

Rubriche

9 Editoriale

di Marco Cattaneo

10 Anteprima

12 Lavori in corso

14 Intervista

Un'autostrada di luce per la scienza di Riccardo Oldani

16 Made in Italy

La ricchezza degli insetti di Letizia Gabaglio

18 Scienza e filosofia

Musei in evoluzione di Telmo Pievani

19 Appunti di laboratorio

Trovata la bussola biologica? di Edoardo Boncinelli

20 Il matematico impertinente

Assicurazioni matematiche di Piergiorgio Odifreddi

21 La finestra di Keplero

Tutti i protoni dell'universo di Amedeo Balbi

22 Homo sapiens

Quando tornammo in Africa di Giorgio Manzi

90 Rudi matematici

Olimpiadi condominiali

di Rodolfo Clerico, Piero Fabbri e Francesca Ortenzio

92 Libri & tempo libero

96 Povera scienza

Fregati dalla Luna di Paolo Attivissimo

97 Pentole & provette

Costine che si sciogliono di Dario Bressanini

SCIENZA NEWS

23 Modificare la linea germinale?
24 Il meteo del nucleo galattico attivo
24 Primi inediti risultati da Chang'e-3
25 Lunga vita all'elettrone

25 Il mistero dei lampi radio veloci
26 Quando il Nord Europa
si raffreddò
26 A rischio i fringuelli di Darwin

27 Le cause del cancro
27 L'evoluzione del ribosoma
e l'alba della biochimica
28 Brevissime

*Non contiene glutine o i suoi derivati. L'indicazione consente una decisione informata ai soggetti con "Sensibilità al glutine non-celiaca (Gluten Sensitivity)". **Anche contenuti residui di nickel possono creare, in particolare nei soggetti predisposti, reazioni allergiche o sensibilizzazioni. Quindi ogni lotto è analizzato per garantire un contenuto di nickel inferiore a 0,00001%.

L'ANTICADUTA È KETO SYSTEM

PER IL **74%** DEI SOGGETTI

**RALLENTA VISIVAMENTE
LA CADUTA DEI CAPELLI***



UOMO

DONNA

Nickel Tested**

SENZA

Conservanti
Profumo
Glutine*

PER IL **70%** DEI SOGGETTI
**CAPELLI PIÙ FORTI
E CORPOSI***

DEFENCE KS™

FAVORISCE LA NATURALE RICRESCITA DEI CAPELLI**

Con il programma **IN&OUT**
risultati ancora più evidenti:

- Integratore alimentare TricoSAFE 100
- Shampoo Anti-hair loss

BIONIKE
PER IL BENE DELLA
PELLE SENSIBILE

In Farmacia

*TEST DI AUTOVALUTAZIONE LOZIONE ANTICADUTA: "Valutazione soggettiva dell'efficacia, gradevolezza e tollerabilità di un prodotto cosmetico", condotta da ElicHub, Academic Spin-off University of Pavia su 100 soggetti, di ambo i sessi, con diversi gradi di diradamento del cuoio capelluto, con applicazione quotidiana per 1 mese. **TEST COSMETOCLINICO LOZIONE ANTICADUTA in doppio cieco, verso placebo, su 60 soggetti, di ambo i sessi, con applicazione quotidiana per 3 mesi.



PER CHI AMA LA SCIENZA, SARÀ LA PIÙ GRANDE SCOPERTA.

LESCIENZE.IT IL SITO TUTTO NUOVO CHE OFFRE UN QUADRO AMPIO, AGGIORNATO E APPROFONDITO SUL MONDO SCIENTIFICO.

L'edizione italiana di "Scientific American" è online con un nuovo sito, arricchito da un notiziario scientifico, dalle pubblicazioni dei ricercatori italiani nel mondo e da una grafica chiara e accattivante. Un punto di riferimento prezioso, per essere sempre aggiornati su tutte le ultime scoperte e ricerche. In più, per chi si abbona alla rivista cartacea, il vantaggio esclusivo di poter consultare senza limiti l'intero archivio di articoli della rivista, dal 1968 ad oggi. Con Le Scienze, nasce un sito tutto da scoprire.

ABBONATI A "LE SCIENZE" E AVRAI ACCESSO A TUTTO L'ARCHIVIO ONLINE.



www.lescienze.it

Le Scienze
edizione italiana di Scientific American



di Marco Cattaneo

La fine dell'informazione

La diffusione di notizie false in rete è inarginabile

Il 18 dicembre scorso Caitlin Dewey, *columnist* del «Washington Post», annunciava la chiusura della sua rubrica *What was Fake*, «che c'era di falso». Con cadenza settimanale, a partire dal maggio 2014, si era impegnata a smantellare bufale e teorie del complotto che circolavano su Internet.

Per quella settimana avrebbe preparato la sua rubrica come se niente fosse, se non avesse letto gli ultimi risultati del lavoro di Walter Quattrociocchi, direttore del Laboratorio di *computational social science* all'Istituto IMT di Alti Studi di Lucca, rinunciando all'impresa. E, accennando a una bufala che aveva smascherato, riconosceva che «i lettori che avrebbero condiviso senza alcuno spirito critico una storia inverosimile sono esattamente gli stessi che non si sarebbero fatti convincere dal *debunking* del «Washington Post».

Dal lavoro di Quattrociocchi – che lo illustra nell'articolo di copertina di questo numero, intitolato *L'era della (dis)informazione* – emerge che la diffusione di informazioni false, leggende metropolitane e teorie del complotto attraverso i social network è semplicemente inarginabile. Il perché è presto detto. I meccanismi di aggregazione delle informazioni sui social da una parte e i *confirmation bias*, o pregiudizi di conferma, dall'altra – per cui tendiamo a privilegiare le informazioni che confermano le nostre opinioni – concorrono a polarizzare le posizioni. Insomma, se una persona sospetta che i vaccini siano dannosi per la salute, per esempio, troverà in rete innumerevoli conferme alla propria tesi, e non si curerà delle informazioni di segno opposto. E poco importa che le seconde siano accreditate da tutta la comunità medica e scientifica: l'autorevolezza non è un fattore.

A che punto – si chiede Dewey – la società diventa completamente irrazionale? È questo il punto in cui cominciamo a segmentarci in realtà alternative? Sono interrogativi su cui è bene riflettere. Perché la tanto celebrata democrazia dell'informa-

zione in rete potrebbe mettere in profonda crisi la relazione tra informazione e conoscenza acquisita, favorendo i meccanismi della disinformazione. Con buona pace di chi aveva auspicato la nascita di una nuova era dell'informazione.

Ultimamente uno dei temi su cui ci si è accalorati, fino a scodellare teorie complottistiche tanto improbabili quanto convincenti, è il Complesso del disseccamento rapido dell'olivo individuato in Salento, la cui responsabilità è stata attribuita al batte-



rio *Xylella fastidiosa* e, forse, ad altre cause, di cui hanno parlato Lisa Signorile e Anna Rita Longo sul numero di luglio 2015. Da allora la situazione è andata sempre più aggrovigliandosi, fino al decreto di sequestro degli olivi che avrebbero dovuto essere abbattuti, emesso dalla Procura di Lecce il 18 dicembre.

Allo stato delle cose, la ricerca sulla diffusione di *X. fastidiosa* e sulle dinamiche della malattia è sostanzialmente bloccata. Perché il confronto scientifico possa continuare, è indispensabile che i ricercatori abbiano accesso alle perizie scientifiche disposte dalla Procura e possano riprendere campionamenti e analisi. Per questo abbiamo pubblicato una lettera aperta a Cataldo Motta, procuratore di Lecce, sul nostro sito. Perché per salvare gli olivi pugliesi potrebbe non esserci il tempo di un processo.

Comitato scientifico

Leslie C. Aiello
presidente, Wenner-Gren Foundation for Anthropological Research

Roberto Battiston
professore ordinario di fisica sperimentale, Università di Trento

Roger Bingham
docente, Center for Brain and Cognition, Università della California a San Diego

Edoardo Boncinelli
docente, Università Vita-Salute San Raffaele, Milano

Arthur Caplan
docente di bioetica, Università della Pennsylvania

George M. Church
direttore, Center for Computational Genetics, Harvard Medical School

Rita Colwell
docente, Università del Maryland a College Park e Johns Hopkins Bloomberg School of Public Health

Drew Endy
docente di bioingegneria, Stanford University

Ed Felten
direttore, Center for Information Technology Policy, Princeton University

Michael S. Gazzaniga
direttore, Sage Center for the Study of Mind, Università della California a Santa Barbara

David Gross
docente di fisica teorica, Università della California a Santa Barbara (premio Nobel per la fisica 2004)

Daniel M. Kammen
direttore, Renewable and Appropriate Energy Laboratory, Università della California a Berkeley

Christof Koch
docente di biologia cognitiva e comportamentale, California Institute of Technology

Lawrence M. Krauss
direttore, Origins Initiative, Arizona State University

Morten L. Kringelbach
direttore, Hedonia: TrygFonden Research Group, Università di Oxford e Università di Aarhus

Steven Kyle
docente di economia applicata e management, Cornell University

Robert S. Langer
docente, Massachusetts Institute of Technology

Ernest J. Moniz
docente, Massachusetts Institute of Technology

John P. Moore
docente di microbiologia e immunologia, Weill Medical College, Cornell University

M. Granger Morgan
docente, Carnegie Mellon University

Miguel Nicolelis
condirettore, Center for Neuroengineering, Duke University

Martin Nowak
direttore, Program for Evolutionary Dynamics, Harvard University

Robert Palazzo
docente di biologia, Rensselaer Polytechnic Institute

Telmo Plevani
professore associato filosofia delle scienze biologiche, Università degli Studi di Padova

Carolyn Porco
leader, Cassini Imaging Science Team, e direttore, CICLOPS, Space Science Institute

Vilayanur S. Ramachandran
direttore, Center for Brain and Cognition, Università della California a San Diego

Lisa Randall
docente di fisica, Harvard University

Carlo Alberto Redi
docente di zoologia, Università di Pavia

Martin Rees
docente di cosmologia e astrofisica, Università di Cambridge

John Reganold
docente di scienza del suolo, Washington State University

Jeffrey D. Sachs
direttore, The Earth Institute, Columbia University

Terry Sejnowski
docente e direttore del Laboratorio di neurobiologia computazionale, Salk Institute for Biological Studies

Michael Snyder
docente di genetica, Stanford University School of Medicine

Giorgio Vallortigara
docente di neuroscienze, direttore associato, Centre for Mind/Brain Sciences, Università di Trento

Lene Vestergaard Hau
docente di fisica e fisica applicata, Harvard University

Michael E. Webber
direttore associato, Center for International Energy & Environmental Policy, Università del Texas ad Austin

Steven Weinberg
direttore, gruppo di ricerca teorica, Dipartimento di fisica, Università del Texas ad Austin (premio Nobel per la fisica 1979)

George M. Whitesides
docente di chimica e biochimica, Harvard University

Nathan Wolfe
direttore, Global Viral Forecasting Initiative

Anton Zeilinger
docente di ottica quantistica, Università di Vienna

La storia di Albert

A marzo in allegato a richiesta *Il cosmo di Einstein*, un libro di Michio Kaku

Il genio di Albert Einstein raccontato da uno dei fisici più conosciuti non solo per l'attività professionale, ma anche per quella divulgativa. A marzo, allegato a richiesta al numero di «Le Scienze» e in vendita nelle librerie per Codice Edizioni, troverete *Il cosmo di Einstein*, il libro sulla vita e sulle opere del grande fisico tedesco scritto da Michio Kaku, che ha all'attivo tra l'altro diversi *best seller* nel campo della divulgazione scientifica. Il fisico teorico statunitense di origini giapponesi è uno dei tanti ricercatori che hanno raccolto l'eredità di Einstein. Nel corso della sua carriera accademica, oggi è alla Princeton University come *lecturer*, ha affrontato la teoria del tutto, ovvero ha cercato di definire un quadro teorico-matematico in cui riunire le quattro forze fondamentali della natura.

Un tentativo in cui si era cimentato anche Einstein dopo la seconda guerra mondiale, nell'ultimo periodo della sua vita, cercando di unificare elettromagnetismo e gravità, tuttavia senza successo, come del resto i fisici che ne avrebbero proseguito l'impresa. Ancora oggi la teoria del tutto è uno dei massimi traguardi da raggiungere.

Il racconto di Kaku divide la storia di Einstein in tre grandi capitoli, in cui vita privata e vita professionale del fisico tedesco si intrecciano senza soluzione di continuità. Nel primo c'è un'immagine che per Kaku è centrale e da cui si sviluppa il resto della storia: l'adolescente Albert per un attimo prova a fantasticare su come gli sarebbe apparso un raggio di luce se avesse potuto sfrecciare alla stessa velocità. Negli anni, quell'immagine sarebbe stata l'esemplificazione della contraddizione tra il quadro derivante dalle leggi di Newton, in cui le velocità si possono sottrarre e sommare, e quello descritto dalla teoria di Maxwell che spiega l'elettromagnetismo, in cui la velocità della luce è costante. La soluzione della contraddizione arriva nel 1905 con la teoria della relatività ristretta.

Nello stesso anno, l'*annus mirabilis*, come sarebbe stato definito, Einstein avrebbe prodotto una spiegazione dell'effetto fotoelettrico, per la quale avrebbe ricevuto il Nobel per la fisica nel 1921, un articolo sul moto browniano in cui per forniva la prima prova sperimentale dell'esistenza degli atomi e un articolo sull'equivalenza tra massa ed energia, in una formula: $E = mc^2$.

Nel secondo capitolo della vita del fisico tedesco, l'immagine centrale è quella dei pianeti come biglie che rotolano su una superficie curva intorno a un centro costituito dal Sole. Semplice e rivoluzionaria, questa istantanea descrive il concetto alla base

della teoria generale della relatività, resa pubblica da Einstein nel 1915. Scalzando Isaac Newton, il quale nel 1666, il suo *annus mirabilis*, aveva tra le altre cose elaborato la legge universale delle gravitazione, Einstein ha ridefinito la gravità.

Questa forza trae origine dalla curvatura dello spazio e del tempo causata dalla presenza della massa. Da questo nuovo punto di vista, le forze studiate da Newton erano solo un'illusione generata dalla curvatura stessa dello spazio. Questa nuova teoria avrebbe avuto effetti a cascata in altri ambiti, per esempio in quello cosmologico e in quello astrofisico rispettivamente con la genesi della teoria del big bang e la definizione dei buchi neri.

Il terzo e ultimo capitolo è dedicato al periodo finale della vita di Einstein, come già ricordato, in particolare alla ricerca della cosiddetta teoria del campo unificato, una delle versioni della teoria del tutto, ancora oggi il Sacro Graal della fisica. In tutti e tre i capitoli c'è anche spazio per i dubbi e rimorsi del grande genio, per esempio nei riguardi della meccanica quantistica e della visione erronea di un cosmo statico. E c'è spazio anche per l'impegno di Einstein nel contrastare la proliferazione delle testate atomiche, in un ritratto limpido e profondo di una delle figure che hanno scritto pagine fondamentali della storia dell'umanità.



RISERVATO AGLI ABBONATI

Gli abbonati possono acquistare i volumi di **La Biblioteca delle Scienze** al prezzo di € 8,40 incluso il prezzo di spedizione e telefonando al numero 199.78.72.78 (0864.256266 chi chiama da telefoni non abilitati).

La stessa offerta è valida per acquistare i volumi della collana **I grandi della scienza** nella nuova edizione al prezzo di € 6,90 incluso il prezzo di spedizione. Il costo massimo della telefonata da rete fissa è di

14,37 cent di euro al minuto più 6,24 cent di euro di scatto alla risposta (IVA inclusa). Per chiamate da rete mobile il costo massimo della chiamata è di 48,4 cent di euro al minuto più 15,62 cent di euro di scatto alla risposta (IVA inclusa).

Alla scoperta della vita

A richiesta in edicola il quinto volume della collana *La scienza per gioco*

Come è nata e si è evoluta la vita sulla Terra? Può esistere su altri pianeti e come potrebbe essere? Sono domande che chiunque di noi si è posto almeno una volta, poco importa che sia grande o piccolo. Le risposte potete trovarle in due volumi della collana *La scienza per gioco*, forse non sempre definitive, ma di certo complete di tutto quello che gli scienziati possono dire allo stato attuale delle conoscenze.

La quinta uscita della collana, in edicola a febbraio a 9,90 euro oltre al prezzo della rivista, riguarderà la biologia. In *Che cos'è la vita?*, Robert Winston, volto noto della BBC e autore di altre uscite della collana, cercherà di rispondere alla domanda che dà il titolo al volume.

Il punto di inizio sono i mattoncini elementari alla base di tutti gli organismi, e non poteva essere altrimenti. Grazie alle illustrazioni inizieremo a fare la conoscenza con le molecole di carbonio, idrogeno, ossigeno, azoto, zolfo e fosforo, senza le quali la vita per come la conosciamo sarebbe impossibile. Aumentando via via di complessità, ma sempre in modo chiaro nell'esposizione, giungiamo alla varietà della vita che caratterizza la Terra, addirittura in ambienti estremi.

Sul nostro pianeta ci sono zone con pressioni impossibili per noi esseri umani, come anche temperature inavvicinabili sia per il caldo sia per il gelo. Eppure per molte altre specie, questi luoghi infernali sono invece nicchie ospitali. Lo studio di queste specie peculiari di ambienti terrestri estremi non è solo una mera curiosità, ma potrebbe fornirci indizi su eventuali forme di vita extraterrestre e su come cercarle.

Il prossimo mese, marzo, sarà la volta di un tema che ha segnato non solo la storia della scienza, ma in generale quello della cultura. A richiesta con la rivista potete trovare *La rivoluzione dell'evoluzione*, a cura sempre di Robert Winston. Il protagonista è Charles Darwin assieme al suo libro *L'origine delle specie*, che a metà dell'Ottocento rimosse l'essere umano dallo scranno più alto del regno animale.



Tra storia e scienza, viene illustrato il dibattito che ha portato alla teoria dell'evoluzione per selezione naturale, scatenando una vera e propria rivoluzione. Inoltre c'è spazio anche per il presente, con le più recenti scoperte della genetica: che ruolo hanno i geni nella selezione delle specie e come agiscono? E se pensate che l'evoluzione sia una cosa che non ci riguarda, l'ultima parte del libro vi smentirà e stupirà. Anche la nostra specie non può sfuggire a questa legge della natura, proprio come ogni forma di vita.

PIANO DELL'OPERA

OTTOBRE

Il laboratorio delle meraviglie

Un'infinità di esperimenti per costruire razzi, aerei e altre diavolerie.

NOVEMBRE

Che la forza sia con te

Scopriamo le forze che hanno dato forma agli atomi come ai pianeti.

DICEMBRE

La danza degli elementi

Come si trasforma la materia grazie ai trucchi della chimica.

GENNAIO 2016

Il magico mondo dei numeri

Un viaggio da zero all'infinito e oltre, tra numeri magici e forme bizzarre.

FEBBRAIO

Che cos'è la vita?

Esplora il mondo dai microbi fino a noi, per svelare i misteri della vita.

MARZO

La rivoluzione dell'evoluzione

Dai fringuelli delle Galápagos che ispirarono Darwin fino al DNA.

APRILE

Che hai nella testa?

Perché ridiamo? Perché sogniamo? La fantastica macchina del cervello.

MAGGIO

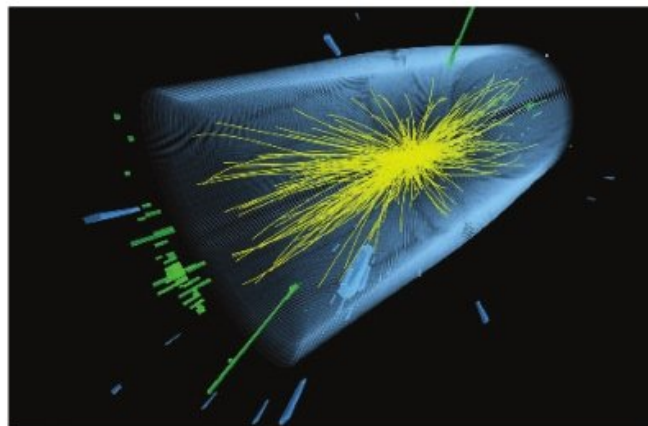
Perché io sono io

Ognuno di noi è diverso da tutti gli altri. Andiamo insieme a capire perché.

Indizi di un nuovo bosone?

Un eccesso di fotoni rilevato nel Large Hadron Collider intriga i fisici delle particelle

Se son rose, fioriranno. Deve essere stato questo il primo pensiero dei fisici del CERN di Ginevra che a metà dicembre scorso hanno affollato una conferenza sui risultati del secondo *run* del Large Hadron Collider (LHC), il collisore di particelle ora in grado di produrre urti tra protoni a 13 teraelettronvolt dopo tre anni di arresto tecnico. I gruppi ATLAS e CMS di LHC hanno riportato un eccesso di produzione di coppie di fotoni a un'energia di 750 gigaelettronvolt (GeV). Potrebbe essere una fluttuazione statistica oppure il primo indizio di una nuova particella elementare assai massiccia, un bosone, molto più massiccia del quark top, la particella elementare più pesante (173 GeV) tra quelle note. Solo il tempo lo dirà, e la parallela acquisizione di ancora più dati. Ma la ditta incrociata al CERN sono tante (si veda *L'imminente rivoluzione della fisica delle particelle* in «Le Scienze» n. 476, aprile 2008).



Bussola proteica



Occhio magnetico.

Un complesso proteico nella retina dei piccioni è candidato al ruolo di bussola biologica.

La capacità di molte specie animali di orientarsi e spostarsi in funzione del campo magnetico terrestre è ben nota. Meno noto invece è come facciano, per esempio piccioni e formiche, a percepire questo campo: in altre parole ancora non chiaro come è fatta la bussola biologica alla base di questa capacità che tanto incuriosisce anche gli scienziati (si veda *Il senso della bussola* in «Le Scienze» n. 523, marzo 2012).

Un passo in avanti arriva dal ricercatore cinese Can Xie della Peking University. In uno studio pubblicato su «Nature Materials», Qin ha identificato un complesso proteico che si orienta in direzione di un campo magnetico esterno. Il complesso è com-

posto dal fotorecettore proteico per la luce blu denominato Cry, già noto agli scienziati, e da una proteina polimerica indicata con MagR scoperta durante lo studio grazie a un'analisi del genoma del moscerino della frutta. La sintesi di questa struttura è però codificata da geni presenti in molti animali, come ha mostrato Xie, il quale ha anche scoperto che MagR/Cry è stabile nella retina dei piccioni e può formarsi in farfalle, topi, balene e cellule umane. Non è ancora chiaro come il complesso sia coinvolto nel meccanismo di percezione del geomagnetismo, gli indizi a suo carico in qualità di bussola biologica sono numerosi, ma rimangono ancora dei dubbi (si veda la rubrica *Apunti di laboratorio* a p. 19).

I denti dell'Hobbit

A 11 anni dalla pubblicazione della scoperta su «Nature», *Homo floresiensis*, soprannominato come «Hobbit» per via delle sue piccole dimensioni, continua a far discutere. È una specie a sé stante del genere *Homo* oppure i fossili venuti alla luce sull'isola di Flores in Indonesia e datati 18.000 anni fa, sono di individui della nostra specie, *H. sapiens*, sofferenti di disturbi della crescita?



Umani diversi.

Cranio di *H. floresiensis*, a sinistra, e a destra ricostruzione al computer di cranio di *H. sapiens*.

Le prove fin qui ottenute propendono fortemente per il primo scenario, ovvero l'Hobbit è una specie umana estinta con un cervello circa un terzo del nostro e alto circa un metro (si veda *Ultimissime sull'uomo di Flores* in «Le Scienze» n. 497, gennaio 2010). Anche l'analisi di 40 denti di *H. floresiensis* pubblicata di recente su «PLoS One» da Yousuke Kaifu, dell'Università di Tokyo, propende per la prima ipotesi. I risultati del paleoantropologo giapponese dimostrano che la morfologia dentale dell'Hobbit è unica se confrontata con quella di esseri umani moderni di tutti i continenti e con quella di altre specie umane estinte e del genere *Australopithecus*. L'analisi ha inoltre mostrato

una forte somiglianza tra la morfologia dentale di *H. floresiensis* e quella di *H. erectus*, in linea con l'ipotesi secondo cui l'Hobbit deriverebbe proprio da una popolazione asiatica di *H. erectus*.

Attrattanti antiprotoni

La conoscenza delle proprietà dell'antimateria è sempre più dettagliata, anche grazie a soluzioni tecniche (si veda *Antimateria fredda* in «Le Scienze» n. 444, agosto 2005) che permettono di studiare questa forma di materia prevista per via teorica alla fine degli anni venti dal fisico britannico Paul Dirac.

Uno studio pubblicato su «Nature» dalla collaborazione internazionale STAR ha dimostrato che gli antiprotoni, particelle con massa del protone ma con carica negativa, si attraggono proprio come le loro controparti della materia ordinaria. Vale a dire che quando gli antiprotoni, ottenuti dagli autori facendo collidere ioni oro, si trovano molto vicini tra loro iniziano a sperimentare l'equivalente della forza forte che tiene uniti i protoni. Un risultato che per quanto possa sembrare ovvio non era dato per scontato dai fisici della materia.

Oggi puoi leggere
Le Scienze direttamente su iPad.



La nuova applicazione disponibile sull'edicola Newsstand di iPad.

Porta Le Scienze sempre con te. Scarica l'applicazione sul tuo iPad e sfoglia i migliori approfondimenti su scienza, tecnologia ed innovazione. Scegli l'abbonamento che preferisci e leggi la rivista in prova gratuita per 1 mese.

Le Scienze

Un'autostrada di luce per la scienza

Davide Calonico illustra la rete in fibra ottica che riunirà lungo un'unica dorsale i principali centri di ricerca italiani e sarà fondamentale per molti settori di studio

Agli inizi del Novecento fu la ferrovia a unire l'Italia, collegando tutte le regioni. Oggi, una rete in fibra ottica ad alta tecnologia promette di replicare quell'impresa e di riunire lungo un'unica dorsale alcuni tra i principali centri della nostra ricerca. Alla guida dell'ambizioso progetto, denominato LIFT (Link Italiano per la Frequenza e il Tempo) è l'Istituto nazionale di ricerca metrologica (INRIM), che a Torino cura e gestisce gli orologi atomici da cui proviene il segnale orario italiano. Ne abbiamo parlato con Davide Calonico, primo ricercatore all'istituto torinese, uno degli ideatori del progetto insieme al collega Filippo Levi.

Qual è l'idea di base del progetto LIFT?

Vogliamo creare una rete in fibra ottica in grado di trasportare senza interruzioni un segnale laser di tempo e di frequenza, fondamentale per la ricerca in molti settori, come la geodesia, cioè la misurazione della Terra, l'astronomia, la fisica atomica e molecolare o la ricerca di base sulla gravità e sulle costanti fondamentali. Ma i segnali di tempo e frequenza sono essenziali anche in molte attività produttive: telecomunicazioni, transazioni finanziarie, industria manifatturiera, informatica. Anche per gestire la distribuzione dell'energia elettrica.

Non è però una rete normale. Quali sono le sue particolarità?

La nostra rete in fibra ottica è concepita in modo da inviare un segnale di tempo e frequenza, generato da un laser ultrastabile, in modo bidirezionale, cioè andata e ritorno, e senza interruzioni. La bidirezionalità è fondamentale per correggere il rumore e i disturbi prodotti dalla fibra stessa, per esempio da allungamenti prodotti da movimenti sismici o da altre cause. Il segnale di ritorno ci consente di misurare l'errore e correggerlo con un segnale uguale e contrario.

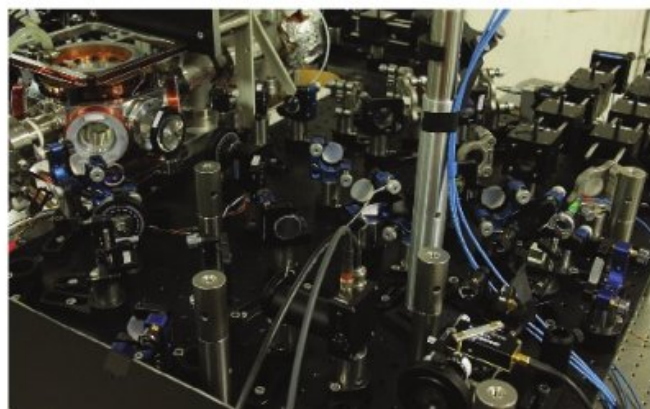
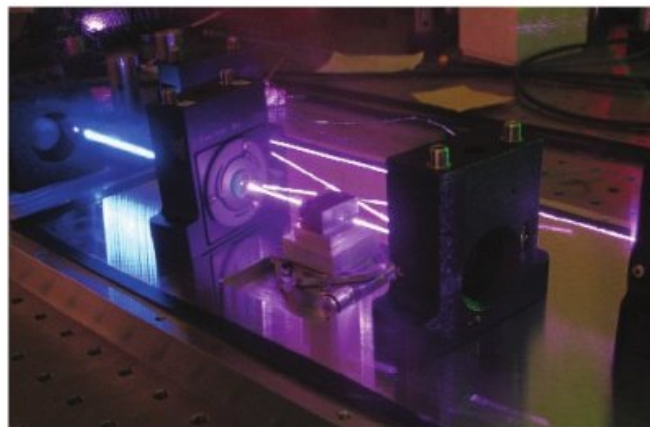
Per la nostra rete ci serviamo della fibra del Consorzio GARR, la rete telematica italiana dell'università e della ricerca, e del Consorzio Top-IX, costituito per il traffico internet nel nord-ovest. Questo sistema garantisce una precisione eccezionale nella trasmissione del segnale orario, molto migliore rispetto al satellite. È anche molto più sicuro e meno sensibile a interferenze o disturbi.

Come procede la realizzazione?

Un primo tratto della connessione ha già unito l'INRIM di Torino con il polo scientifico di Sesto Fiorentino, che ospita l'Università di Firenze, strutture del CNR come l'Istituto nazionale di ottica e il LENS, il Laboratorio europeo di spettroscopia non lineare. Sono già collegati anche l'Osservatorio radioastronomico di Medicina, vicino a Bologna, gestito l'Istituto nazionale di astrofisica (INAF) e il laboratorio sotterraneo del Frejus. Entro pochi mesi, grazie in particolare all'impulso del presidente dell'INRIM, Massimo Ingu-



Lancette atomiche. L'orologio a fontana di cesio dell'INRIM che scandisce il segnale orario italiano, uno dei cinque orologi più precisi al mondo. Sotto, particolari dell'orologio ottico a itterbio, in fase di sviluppo all'INRIM. Raggiungerà una precisione superiore rispetto all'orologio a cesio. Collegato in rete ottica con altri istituti di misura del tempo d'Europa, potrebbe portare a una ridefinizione del secondo.





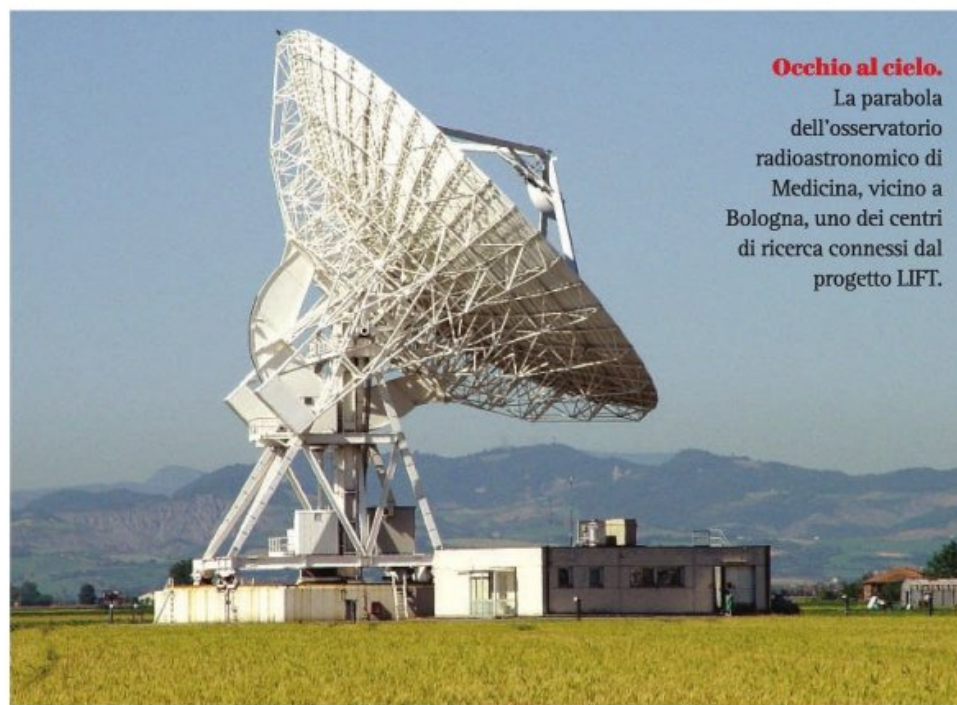
Davide Calonico è un fisico, primo ricercatore all'INRIM di Torino, dove sviluppa orologi atomici basati sul raffreddamento laser e si occupa di misure di tempo e frequenza ad altissima precisione per la metrologia primaria e per lo studio della fisica fondamentale.

Tra le realizzazioni del suo gruppo, il primo orologio atomico italiano, tra i cinque orologi più precisi al mondo per la generazione del Tempo Internazionale. Il gruppo lavora anche al link italiano in fibra ottica per il tempo e la frequenza e allo sviluppo di un orologio atomico ba-

sato su atomi di itterbio raffreddati al laser, per la ridefinizione del secondo.

È responsabile INRIM di progetti nazionali ed europei e dal 2015 presiede, nell'ambito della Convenzione del metro, il gruppo internazionale di studio sulle fibre ottiche per la metrologia di tempo.

scio, la rete raggiungerà il Centro di geodesia spaziale di Matera, che fa capo all'Agenzia spaziale italiana, passando per il Centro spaziale del Fucino di Telespazio, uno dei due in Europa destinati a gestire il sistema di navigazione europeo Galileo. In prospettiva immaginiamo connessioni con il radiotelescopio di Noto, in Sicilia, e con l'Osservatorio di Cagliari, entrambi dell'INAF. Un ulteriore tratto dovrebbe poi collegare Olbia a Roma, chiudendo un'immenso cerchio nel Tirreno, che potrebbe avere impieghi anche nello studio dei vulcani compresi tra Campania e Sicilia.



Occhio al cielo.

La parabola dell'osservatorio radioastronomico di Medicina, vicino a Bologna, uno dei centri di ricerca connessi dal progetto LIFT.

tare i nostri orologi in modo molto più veloce e preciso rispetto al satellite. La rete tra i quattro laboratori è quasi completa, manca solo un breve tratto tra Italia e Francia previsto entro giugno 2016. A quel punto sarà possibile perfino una ridefinizione del secondo, l'unità di misura del tempo, ora basata sulle frequenze dell'atomo di cesio. La comparsa di nuovi orologi ottici ancora più precisi, infatti, apre nuove prospettive: collegarli tramite fibra è il modo migliore per confrontarli. Ma poi ci sono moltissime altre applicazioni: per esempio collegare orologi così sensibili permette

di misurare gli effetti della gravità sul tempo e di effettuare test sull'esattezza della relatività.

Sono in rete anche osservatori radioastronomici. Perché?

Osservatori di questo tipo, lontani tra loro e messi in rete, raggiungono una risoluzione inversamente proporzionale alla loro distanza: quindi più sono lontani più lontano possono vedere nel cosmo.

Questo gli astronomi già lo sanno, ma il limite sta proprio nel sistema di collegamento tra le antenne, oggi affidato ai satelliti. Il collegamento in fibra ottica è decisamente migliore. A ogni osservatorio della rete è poi abbinato un orologio atomico, per avere una perfetta sincronia delle osservazioni. La nostra fibra ottica lo renderebbe superfluo.

In che modo una rete in fibra ottica aiuta a studiare i vulcani?

Un anello di fibra ottica funziona come un giroscopio ed è in grado di misurare anche minimi movimenti sismici. Questo avviene non solo perché la fibra è sensibile alle vibrazioni ma anche per un fenomeno fisico, l'effetto Sagnac, spiegato dalla relatività ristretta. In un esperimento effettuato a Torino nel 2012 su un anello esteso su circa 20 chilometri quadro di superficie, abbiamo dimostrato che il funziona bene: ora stiamo lavorando con esperti geologi per capire le sue applicazioni.

A che cosa serve trasportare sulla fibra il segnale orario?

Prima di tutto per collegare tra loro i quattro principali laboratori europei di misurazione del tempo, il nostro dell'INRIM e quelli in Francia, Germania e Inghilterra, allo scopo di tarare e confron-

Avete in mente qualche altro impiego?

Ce ne sono tanti, ma citerei in particolare quello nella crittografia. Con la fibra possiamo controllare con estrema precisione il numero di fotoni che trasmettiamo e, in un sistema con un numero limitato di fotoni, osserviamo i fenomeni quantistici della luce.

Che cosa c'entra questo con la sicurezza delle comunicazioni? Se, per esempio, in una trasmissione tra due nodi, si intromette uno spione e intercetta il messaggio, causerà un'alterazione nel sistema quantistico di fotoni lasciando una traccia visibile al destinatario, che si accorgerà dell'intromissione. Sfruttando queste proprietà della luce è possibile creare nuovi schemi di crittografia, definita appunto «quantistica», praticamente impenetrabili. Stiamo lavorando a questo progetto con una *spin-off* dell'Università di Ginevra, IDQuantique.

La ricchezza degli insetti

Diptera produce farine derivate da larve di mosca da usare nei mangimi come soluzione meno costosa e più ecosostenibile rispetto alla farina di pesce

Biologia e automazione. È dalla passione per queste due discipline che nasce la storia di Diptera, la *start-up* che, unica in Italia, produce farina per l'alimentazione animale a partire da insetti. La passione è quella di Vittorio Bava che, nonostante una laurea in economia, un'esperienza di lavoro in Google, e una possibile carriera nel mondo del *marketing* digitale, ha sempre coltivato interesse per il mondo degli esseri viventi. «Anche quando lavoravo in Irlanda per Google, nel tempo libero leggevo molte cose sull'argomento», racconta Bava.

L'idea per unire i suoi interessi e realizzare un progetto che guardasse alla sostenibilità economica del pianeta arriva in un viaggio in Asia: «Nel 2013, chiusa l'esperienza di Google e quella di una prima *start-up* che avevo co-fondato, ho deciso di andare da Tokyo a Melbourne minimizzando l'uso degli aerei, per vedere quello spicchio del pianeta. Ho quindi avuto modo e tempo di scoprire la cultura asiatica e sono rimasto colpito dall'uso che quelle popolazioni fanno degli insetti a scopo alimentare», va avanti.

Non solo in Asia

Incuriosito dalle potenzialità di questa fonte alimentare, Bava scopre che anche fuori dall'Asia c'è chi ha pensato di usare gli insetti per produrre cibo: negli Stati Uniti i culturisti che fanno uso di integratori proteici possono comprare barrette a base di farina di grillo, molto nutriente e anche molto costosa.

«L'idea non è nuova ma fuori dall'Asia, al di là del mercato di nicchia delle palestre o dei piatti di alcuni chef stravaganti, è davvero difficile pensare di convincere le persone a mangiare insetti. Però poi, studiando meglio il mercato potenziale, mi sono accorto che le opportunità migliori erano nell'alimentazione animale, dove c'è una vera e propria crisi delle proteine», racconta Bava. Molte specie di animali da allevamento vengono nutrite principalmente con mangimi contenenti farine a base di pesce, ma il progressivo spopolamento dei mari da una parte e dall'altra l'aumento delle persone che nel mondo escono dalla condizione di povertà, e quindi introducono carne nella loro alimentazione, rendono più che mai urgente trovare soluzioni alternative. Gli insetti, una volta essiccati, vengono trasformati in farine che possono essere sostituite alla farina di pesce nella composizione dei mangimi perché ricche di proteine, grassi e sali minerali.

«Oggi più di un terzo del pescato è usato per produrre farine alimentari e non si può pensare di aumentare la produzione. Come sfamare quindi almeno cinque miliardi di persone che escono dalla povertà? Anche la via vegetale non può essere percorsa: già oggi il 70 per cento dei terreni coltivabili è usato per foraggi e il margine è quindi esiguo. La risposta potrebbe essere allevare insetti in maniera sicura, efficiente, automatizzata», spiega Bava.

Il giovane imprenditore si mette a studiare: la biologia degli in-

LA SCHEDA

Diptera



Fatturato
n.d.



Investimenti in ricerca
n.d.



Dipendenti/collaboratori
4 di cui 3 impiegati in R&S



Brevetti rilasciati
2 domande



setti, per cercare la specie migliore da allevare, e i sistemi di automazione, per capire come realizzare un impianto di produzione, progettare il processo di allevamento e trasformazione, mettere a punto un programma capace di monitorare in tempo reale lo stato di salute delle larve. Intanto il 2013 si sta per chiudere, Bava è a Londra per cercare lavoro. «Mentre valutavo proposte nel campo del marketing digitale, un amico a cui avevo parlato della mia idea mi segnala la Global Social Venture Competition, un

Per animali e per umani.

Primo piano di *Hermetia illucens*, la specie di mosca usata dall'azienda pugliese Diptera per ottenere farine destinate ai mangimi animali. Sotto, fiori, funghi, uccelli e grilli in vendita a Vientiane, in Laos, per il consumo umano.



glia per le condizioni ambientali, adatte all'allevamento degli insetti, e finanziarie, grazie agli incentivi regionali per la creazione di start-up. Nel frattempo il giovane imprenditore ha deciso quale sarà l'insetto alla base della produzione: *Hermetia illucens*, la mosca soldato nera. «Si tratta di una specie innocua, a cui non piace il contatto con l'essere umano. Le sue larve sono voraci e quindi sono ottimi bioconvertori», spiega Bava.

L'idea è nutrire le larve con sottoprodotti della lavorazione alimentare, scarti presi da altre industrie o da mercati ortofrutticoli, e quindi trasformarle per ricavarne i nutrienti: gli insetti convertono queste risorse, che altrimenti andrebbero sprecate, in proteine e grassi che possono essere usati nella mangimistica. E lo fanno in maniera molto efficiente.

Al primo premio se ne aggiungono presto altri: nel 2014 Diptera partecipa alla StartCup Puglia e vince il premio nella categoria Agrifood-Cleantech; nella stessa categoria e nello stesso anno vince anche al Premio nazionale per l'innovazione; è una delle quattro vincitrici della Call for Ideas organizzata da SiFood-ComNext; una delle due vincitrici del premio Innovazione contro lo spreco alimentare, organizzato da Altran.

Primi in Italia

Arriva così il 2015 e la realizzazione dell'impianto pilota a Manfredonia, in provincia di Foggia. «Il nostro è il primo stabilimento di questo tipo in Italia: per realizzarlo ci siamo attenuti alle normative europee e abbiamo preso spunto dai nostri concorrenti internazionali. Il dialogo con le autorità è costante, proprio perché si tratta di un campo nuovo, dove anche le norme non sono del tutto chiare», sottolinea Bava. Ma il più sembra ormai fatto e nel primo trimestre 2016 è attesa la messa in funzione dei macchinari.

«Il nostro processo è innovativo e diverso da quello di altre aziende che operano in questo settore perché è per la maggior parte automatizzato: in questo modo si abbattano i costi di produzione ma soprattutto si ha maggiore flessibilità ed efficienza. In futuro, per esempio, potremmo pensare di ottenere farine diverse a seconda delle caratteristiche degli scarti alimentari con cui nutriamo le larve. Venendo incontro in maniera personalizzata alle esigenze dei produttori di mangimi», conclude l'imprenditore.

concorso internazionale indetto dalla HAAS School of Business di Berkeley, e organizzato in Italia dall'Alta scuola impresa e società dell'Università Cattolica del Sacro Cuore di Milano. L'obiettivo è favorire imprese a forte rilevanza sociale o ambientale. Decido di scrivere un *business plan* e di partecipare. A febbraio 2014 Diptera vince il premio per la «*best green and circular economy idea*». A quel punto non resta che tornare definitivamente in Italia e decidere dove far risiedere l'azienda. La scelta cade sulla Pu-

di Telmo Pievani

è professore associato di filosofia delle scienze biologiche dell'Università degli Studi di Padova



Musei in evoluzione

In Europa grandi musei scientifici e naturalistici si stanno rinnovando. E in Italia?

Al Natural History Museum di Londra, i ricercatori che vi lavorano e i visitatori sono separati da pareti di cristallo. Nel moderno Darwin Centre si accede a una grande struttura a forma di bozzolo, il Cocoon. In un cammino a spirale dall'alto in basso si possono osservare le cassette dei reperti, i fondi bibliotecari storici, i laboratori con macchinari di ultima generazione, e sui banconi o al computer scienziati indaffarati. Lungo il percorso un apparato esplicativo accompagna gli ospiti raccontando – attraverso pannelli, video, modelli, esemplari originali ed *exhibit* interattivi e giocosi – i temi delle ricerche che vengono condotte lì a fianco: banche genetiche, filogenesi molecolari, studi sulla biodiversità, progetti di protezione, missioni di esplorazione sul campo. Accanto, un fitto programma di eventi e spettacoli nel super-tecnologico Attenborough Studio. L'idea è semplice: la ricerca più avanzata, la conservazione dei reperti e la comunicazione della scienza, insieme, affiancate, l'una alleata dell'altra. Se finanzia con le mie tasse la ricerca scientifica o se la sponsorizza da privato, esco contento dal Darwin Centre: ho speso bene i miei soldi.

Le collezioni del museo (75 milioni di reperti) non sono più organizzate per dipartimenti accademici, ma per temi e storie, dalle reti ecologiche ai cambiamenti della superficie terrestre, avendo sempre l'evoluzione come filo conduttore. Passato e presente dialogano. La statua protettiva di Darwin sullo scalone si intravede fra le vertebre colossali di un diplodoco. L'ingresso è gratuito. Le mostre temporanee si susseguono. Il museo organizza progetti di *citizen science*, ricerca scientifica sul campo condotta con l'aiuto di reti di cittadini.

Ogni mattone dell'edificio vittoriano, ogni tessera delle vetrate liberty sprigiona un messaggio coerente: una nazione orgogliosa della sua ricerca scientifica e della sua storia di naturalisti ed esploratori. O in altri termini: la scienza è cultura, per tutti, è sviluppo sociale ed economico. Diverse sezioni in questi mesi sono chiuse per rifacimenti: i cartelli preannunciano le novità in arrivo.

Il museo evolve. Gli allestimenti non sono trascendentali: noi italiani saremmo più creativi nell'idearli. E poi anche nel nostro paese ci sono collezioni ricchissime, in alcuni casi ben più antiche di quelle britanniche. Abbiamo un patrimonio diffuso e policentrico che ha pochi eguali al mondo.

I Royal Botanical Gardens di Kew (50.000 specie di piante distribuite su 120 ettari) sono pieni di strutture didattiche per bambini, aperte in ogni stagione. Andarci con la famiglia diventa una festa. Mostre permanenti e temporanee fanno dialogare anche qui passato vittoriano e ricerca di frontiera. Stanno restaurando la maestosa serra Temperate House del 1899, 200 metri di ferro e vetro. Sarà pronta nel 2018, 35 milioni di sterline l'investimento (46 milioni di euro al cambio attuale). I Kew nascono alla metà del Settecento e sono un capolavoro ben coltivato. In Italia abbiamo giardini botanici più vecchi di Kew anche di un paio di secoli, gioielli da mostrare al mondo intero.



Aperto nel 1881, il Natural History Museum di Londra ha continuato a rinnovarsi, contando su importanti risorse finanziarie. Sopra, un passaggio interno del Darwin Centre.

Cronache simili potrebbero riguardare le maggiori capitali europee, da Berlino a Parigi, dove a poche centinaia di metri dal Musée du Quai Branly sulle arti e civiltà non occidentali, progettato da Jean Nouvel, da mesi ha riaperto i battenti al Trocadéro il Musée de l'Homme, sede espositiva e centro di ricerca e formazione. Costo dell'operazione: 92 milioni di euro. In Italia, chiunque ami la cultura (senza aggettivi) non può che farsi una domanda: ma che cosa abbiamo fatto di male noi italiani per dover sentire governanti che fanno retorica su innovazione e futuro per poi abbandonare da decenni nella più totale penuria di finanziamenti i nostri musei scientifici e naturalistici? Se ogni paese ha la classe dirigente che si merita, abbiamo qualcosa da rimproverarci.



di Edoardo Boncinelli
Università Vita-Salute San Raffaele, Milano

Trovata la bussola biologica?

Un complesso proteico potrebbe essere responsabile del senso magnetico animale

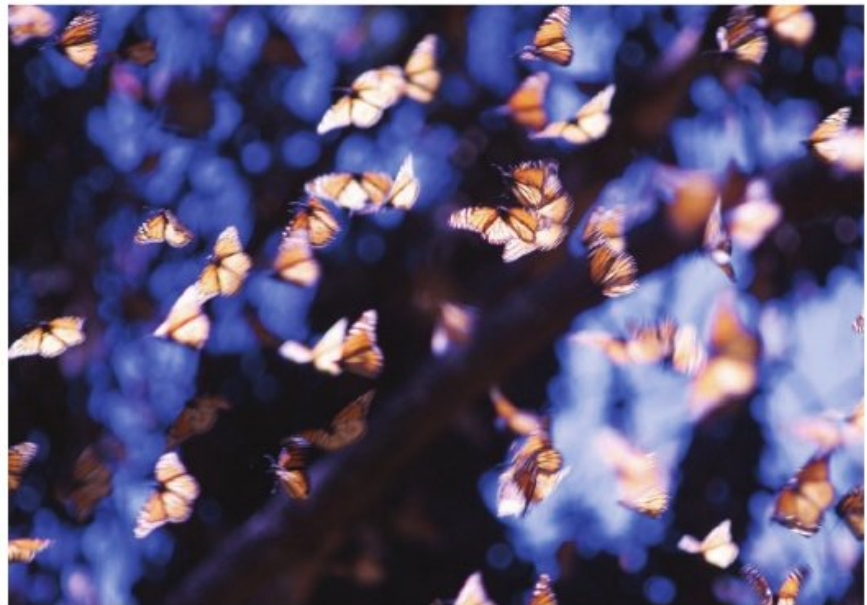
Potrebbe essere una delle maggiori scoperte del 2015, anche se purtroppo manca ancora qualche controllo e una comprensione approfondita del meccanismo. È da molto tempo che si cerca la base biologica del senso dell'orientamento posseduto da molte specie animali – dalle balene alle farfalle, dalle termiti ai piccioni – sulla base del campo magnetico terrestre. Come riportato su «Nature Materials», in un istituto di ricerca di Pechino sarebbe stato individuato nelle cellule del moscerino drosophila un complesso proteico intracellulare capace di orientarsi lungo il suddetto campo magnetico, ma senza una preferenza per il nord o per il sud, una momentanea carenza assai grave (si veda la rubrica Lavori in corso a p. 12).

Nelle cellule ci sono proteine sensibili al campo magnetico terrestre denominate «criptocromi» (Cry). Le drosofile che non ce le hanno non sentono il campo magnetico terrestre. Da tempo, d'altra parte, si ha l'idea che gli atomi di ferro di certe molecole organiche devono in qualche modo entrarci. Ebbene, esiste, sempre in drosophila, una proteina, denominata CG8198, che lega il ferro con un suo residuo di solfuro e che si sa che gioca un ruolo nel controllo del suo ritmo circadiano. La novità è rappresentata dal fatto che questa metalloproteina, legandosi con alcuni criptocromi, forma una sorta di «nanoago», un bastoncino di CG8198 circondato da una guaina di criptocromi. Con il microscopio elettronico si possono osservare gruppetti di questi bastoncini orientarsi in un debole campo magnetico artificiale come aghi di bussola, vere «biobussole», così CG8198 è stato ribattezzata MagR, Magnetic Receptor, ossia recettore magnetico. Quello che manca alla dimostrazione definitiva del fenomeno è un esperimento di inattivazione del gene stesso, per vedere se le drosofile in oggetto perdono la capacità di orientarsi, anche se qualcuno ha affermato in un congresso scientifico di averlo già fatto. Questo dato non è stato però ancora pubblicato e non può quindi ritenersi accertato.

La scoperta cinese offre comunque ai ricercatori la possibilità di usare campi magnetici per controllare le cellule, un po' come è avvenuto nel recente passato per la luce visibile con l'introduzione dell'optogenetica. In questo caso si dispongono particolari proteine sensibile alla luce di una particolare lunghezza d'onda in singoli neuroni del cervello di piccoli animali da esperimento. Se si porta la luce nel cervello mediante apposite fibre ottiche, si ot-

tiene la lesione specifica di questo o quel neurone, e la possibilità di osservarne gli effetti. Con questa prodigiosa tecnica, che usa la luce di una certa lunghezza d'onda come microscopico bisturi di precisione, si è visto per esempio che cosa dimenticano certi moscerini, distruggendo un loro neurone piuttosto che un altro.

In maniera analoga sarebbe possibile manipolare specifiche strutture cellulari applicando un campo magnetico, questa volta anche dall'esterno, senza dovere entrare negli organi in questione. Potrebbe così cominciare l'era della magnetogenetica, lo studio del ruolo di specifiche proteine che si fanno sperimentalmente ruotare in una direzione invece che in un'altra.



L'ago delle farfalle. Tra le specie in grado di sentire il campo magnetico terrestre ci sono le farfalle, che sfruttano questa capacità anche per orientarsi durante lunghe migrazioni.

Si osservi quindi il modo di procedere della scienza di oggi. Prima si cerca di individuare il correlato molecolare di qualche fenomeno, magari macroscopico e molto diffuso, come l'orientamento nei movimenti di certe specie con l'aiuto del campo magnetico. Quando si è capito bene il fenomeno e la sua possibilità di controllo, lo si usa per approntare un nuovo strumento sperimentale e scoprire così un altro interessante fenomeno biologico, che poi andrà studiato, e così via, in un ciclo di domande-risposte-nuove domande che rappresenta un po' l'essenza della scienza stessa, anche se ci sono in giro ancora persone che pensano che il mondo abbia solo 6000 anni come dicono le Scritture. E che si offendono se gli dici che questo è francamente assurdo.

di Piergiorgio Odifreddi

professore ordinario di logica matematica all'Università di Torino
e visiting professor alla Cornell University di Ithaca (New York)



Assicurazioni matematiche

I primi contributi probabilistici all'impresa assicurativa risalgono al XVII secolo

Che le assicurazioni prosperino su un uso, o un abuso, della matematica è una cosa risaputa. Meno noto è invece da chi siano venuti i primi contributi tecnici all'impresa assicurativa. E la sorpresa è che ai suoi inizi si trovano due nomi famosi per tutt'altri motivi: uno olandese, Jan de Witt, e l'altro inglese, Edmond Halley.

Il primo fu uno dei pochi leader politici della storia con una formazione matematica, insieme all'irlandese Éamon De Valera. La cultura matematica di De Witt non gli impedì comunque di cadere in disgrazia e terminare un ventennio di potere repubblicano alla maniera di Mussolini: fu appeso a testa in giù il 20 agosto 1672, insieme al fratello Cornelis, dopo essere stato linciato e fatto a pezzi dalla folla all'Aia. Un quadro coevo che mostra *I cadaveri dei fratelli De Witt*, attribuito a Jan de Baen, si può vedere oggi al Rijksmuseum di Amsterdam, e la storia della loro triste fine è stata raccontata nel 1850 da Alexandre Dumas nel romanzo *Il tulipano nero*.

L'anno prima di morire De Witt pubblicò un lavoro sul valore delle rendite vitalizie rispetto ai titoli a riscatto che fece scalpore. All'epoca a gestire sia i titoli che le rendite era lo Stato, che in entrambi i casi riceveva un capitale anticipato. Nel primo caso lo restituiva interamente e con un interesse alla fine di un periodo prefissato, come si usa ancor oggi con i buoni del Tesoro poliennali. Nel secondo caso lo restituiva a rate sotto forma di un vitalizio, che non teneva però conto dell'età del beneficiario: non sorprendentemente, dunque, l'80 per cento dei beneficiari nominali erano sotto i vent'anni, e il 50 per cento addirittura sotto i dieci!

Il problema era che non si sapeva come calcolare il valore di un vitalizio, e De Witt lo risolse considerando interessi composti e aspettativa di vita. Per valutare quest'ultima l'idea fu di dividere la popolazione morta in un certo anno in fasce di età, e considerare la distribuzione dei decessi come la misura della probabilità di morire a una certa età in quell'anno. Più precisamente, la probabilità di vivere ancora n anni dopo una certa età è il rapporto tra il numero di coloro che muoiono a n anni di più, rispetto a quel-

li che hanno quell'età. L'aspettativa di vita è la somma, per ciascun n , del prodotto di n per la probabilità di vivere ancora n anni.

Per stabilire il valore di un vitalizio da assegnare a una persona bisogna dunque calcolare quanto riceverebbe se visse ancora n anni, moltiplicare per la probabilità che muoia dopo n anni, e sommare su ciascun n . De Witt lo fece, e si accorse che all'interesse corrente lo Stato stava vendendo rendite vitalizie a un prezzo inferiore a quello calcolato con i suoi metodi. Ma la precisione di questi metodi si basava sull'accuratezza della valutazione dell'aspettativa di vita, che De Witt all'epoca stimava essere costante fino ai 50 anni, e via via inferiore tra i 50 e i 60 anni, tra i 60 e i 70, e tra i 70 e gli 80.

È a questo punto che entrò in scena Edmond Halley, l'astronomo reale che ha legato il suo nome alla famosa cometa: raffinando la teoria sviluppata da Newton nei *Principia* riuscì ad accorgersi che le tre comete apparse nel 1531, 1607 e 1682 erano in realtà la stessa, a calcolarne il periodo in circa 75 anni e a prevederne il ritorno nel 1758, come poi effettivamente accadde. Ma Halley fu anche l'eminenza grigia dietro al capolavoro di Newton, perché fu lui a stimolare lo scienziato a risolvere il problema delle orbite dei pianeti, a spingerlo a scrivere le sue scoperte, a finanziare la pubblicazione del libro e a scriverne l'entusiastica ode di prefazione.

Gli interessi di Halley spaziavano in molti campi: dall'invenzione delle campane subacquee a tenuta stagna per le immersioni, nel



Non solo comete. Lo scienziato britannico Halley, che diede contributi cruciali allo sviluppo degli studi demografici.

1691, alla pubblicazione della *Stima del grado di mortalità dell'umanità, dedotta dalle curiose tavole sulle nascite e i funerali della città di Breslau, con un tentativo di determinare il prezzo delle rendite vitalizie*, nel 1693. Oltre a scoprire un metodo simile a quello di De Witt, quest'ultima opera fornì anche il primo vero studio demografico basato su dati reali, invece che supposizioni.

Essa venne considerata come un capolavoro e fece dimenticare la primogenitura di De Witt, i cui metodi probabilistici sono adottati ancora oggi. Senza poter impedire casi come quello della signora Jeanne Calment di Arles, che nel 1965, a novant'anni, barattò la propria casa per un vitalizio, e morì nel 1997 a 122 dopo aver incassato il doppio del valore della casa.



di Amedeo Balbi

Astrofisico, ricercatore al Dipartimento di fisica dell'Università di Roma Tor Vergata

Tutti i protoni dell'universo

Come calcolare in modo accurato il numero totale di queste particelle nel cosmo

“**I**o credo che ci siano 15 747 724 136 275 002 577 605 653 961 181 555 468 044 717 914 527 116 709 366 231 425 076 185 631 031 296 protoni nell'universo, e un numero uguale di elettroni». La singolare affermazione fu pronunciata dal grande astrofisico inglese Sir Arthur Eddington nel 1938, nel corso di una conferenza tenuta presso il Trinity College di Cambridge. Altrettanto singolare (e del tutto sbagliato) era il modo in cui Eddington era giunto alla conclusione: una serie di considerazioni numerologiche che partivano dalla congettura che la costante di struttura fine (che caratterizza la forza dell'interazione elettromagnetica) fosse l'inverso di un numero intero e finivano per mettere in relazione il suo valore con quello del numero complessivo di protoni (e di elettroni) nell'universo.

Questo per ricordare che anche i grandi scienziati, talvolta, possono partire per la tangente. Ma anche per provare a spiegare come abbiamo fatto a misurare davvero il numero di protoni dell'universo osservabile - che è un po' come dire il numero di atomi, visto che l'idrogeno, fatto di un protone e di un elettrone, è di gran lunga l'elemento più abbondante - e per mostrare come questo sia riconducibile a uno dei risultati più impressionanti del modello standard del big bang.

Naturalmente, si potrebbe semplicemente moltiplicare il numero delle stelle esistenti nell'universo (dell'ordine di 10^{22}) per la massa media di una stella, e poi dividere il risultato per la massa del protone (assumendo che le stelle siano fatte prevalentemente di idrogeno e che la massa degli elettroni sia trascurabile). Oppure si potrebbe usare la misura della densità media dell'universo (desunta dalla curvatura dello spazio su grande scala) che, come sappiamo ormai da una quindicina d'anni, equivale a quella di circa sei protoni per metro cubo. Ma sarebbero entrambe stime grossolane: la prima sbaglierebbe per difetto, perché non tutti i protoni si trovano nelle stelle; la seconda per eccesso, perché quella atomica è solo una piccola parte di tutta la materia (ed energia) dell'universo.

In realtà, c'è una strada che porta a risultati molto più accurati. Il punto di partenza è la previsione teorica delle abbondanze di elementi leggeri (idrogeno, deuterio, elio-3, elio-4 e litio-7) prodotti dalle reazioni di fusione nucleare durante i primi tre minuti successivi al big bang. Una previsione risultata in ottimo accor-

do con le abbondanze di questi elementi effettivamente osservate: cosa di per sé straordinaria, e che costituisce uno dei grandi trionfi del modello standard del big bang. Ma c'è di più: confrontando le misure con i modelli, si ottiene una stima molto accurata della densità di protoni (e di neutroni, che sono circa uno ogni sette protoni) presenti nell'universo. La stima, peraltro, coincide con quella che si ottiene, in maniera indipendente, dallo studio della radiazione cosmica di fondo nelle microonde. Questo rafforza la validità empirica del modello del big bang, rendendo estremamente solido il quadro dell'evoluzione fisica del cosmo fino a tempi che risalgono indietro a circa un secondo dopo il big bang.



Dove nascono gli astri. Una regione di formazione stellare nella nostra galassia. Solo il dieci per cento della massa degli atomi esistenti nel cosmo ha finito per formare le stelle.

Va bene, ma quindi quanti protoni ci sono nell'universo? In media, circa 0,3 per ogni metro cubo di spazio, ovvero poco meno del cinque per cento di tutta la materia ed energia esistenti. Questo dato ci conferma che abbiamo bisogno di molta materia oscura di tipo non atomico per spiegare il contenuto totale dell'universo e ci conferma anche che solo il dieci per cento circa della massa degli atomi esistenti ha finito per formare stelle. Infine, se moltiplichiamo la densità di protoni per il volume dell'universo osservabile, otteniamo un numero totale di protoni di circa 10^{80} . È un valore non troppo lontano da quello che aveva calcolato Eddington quasi ottant'anni fa. Questo tuttavia, come si dice, è del tutto accidentale.



Quando tornammo in Africa

Durante il Neolitico ci fu una migrazione dal Vicino Oriente al continente africano

Non ne sapevamo quasi nulla, se non indirettamente. Ora ne sappiamo di più, molto di più, grazie a un lavoro pubblicato di recente su «Science».

Da varie fonti, comprese quelle genetiche (relative soprattutto alla variabilità delle popolazioni attuali), conosciamo l'Africa come il continente dove la nostra specie è nata: l'area di origine di migrazioni antichissime, grazie a cui il mondo intero si è popolato di *Homo sapiens*. Tuttavia, fino a oggi proprio l'Africa era stata il grande assente dagli studi riguardanti il cosiddetto «DNA antico», cioè dalle ricerche basate sul materiale genetico che da una ventina di anni siamo in grado di estrarre dai resti fossili. Il problema è che il clima caldo e umido non è certo il contesto favorevole per la conservazione del DNA nel tempo profondo.

Ma le tecniche e le ricerche in questo campo progrediscono rapidamente. Si è visto di recente che una maggiore quantità di DNA si conserva in una particolare regione della base del cranio: la «rocca petrosa», dove si annidano gli organi dell'orecchio interno. Inoltre, i ricercatori si sono orientati a esaminare reperti che si trovino nelle condizioni ambientali e climatiche più propizie.

È stato così che lo scheletro di un cacciatore-raccoglitore di 4500 anni fa, scoperto nel 2012 in una grotta sugli altipiani dell'Etiopia, la Mota Cave, è stato esaminato da un folto gruppo di ricercatori che fa capo all'Università di Cambridge e all'Università di Dublino, che hanno prelevato materiale osseo dalla rocca petrosa del cranio. Hanno trovato DNA antico e incontaminato, riuscendo dunque a sequenziare un genoma considerato di alta qualità.

Il nuovo studio ha mostrato che il primo genoma preistorico di cui disponiamo in Africa appartene a un uomo dalla pelle bruna, con gli occhi castani (nulla di stupefacente fin qui) e in possesso di tre varianti genetiche che indicano adattamenti alla vita in alta quota. Coerentemente con il fatto che gli altipiani etiopi raggiungono altitudini considerevoli, con picchi ben oltre i 4000 metri, c'è da ritenere che la popolazione a cui l'uomo apparteneva si fosse adattata a quel particolare contesto ambientale da svariati millenni.

Inoltre, confrontato con quello di campioni antichi e recenti (40 in Africa e 81 fra Asia ed Europa), il genoma di quell'uomo indica strette affinità con popolazioni di lingua Ari che ancora oggi vivono sugli altipiani a nord del Lago Turkana, nell'Etiopia meri-

dionale. Gli autori della ricerca hanno allora esaminato quei tratti di DNA che si trovano nel genoma degli Ari e nelle altre popolazioni africane, ma non in quello dello scheletro venuto alla luce nella Mota Cave. Si dovrebbe trattare, hanno dedotto, di varianti che si sono andate integrando con quelle originarie nel corso degli ultimi 4500 anni.

Hanno poi trovato qualcosa di sorprendente. Molte di queste varianti sono le stesse che sono state ricavate da uno scheletro del Neolitico in Germania (LBK, Stoccarda) - grazie al quale abbiamo la sequenza di DNA di uno dei primi agricoltori diffusi in Europa dal Vicino Oriente dopo il Paleolitico - come nelle attuali popula-



Affinità genetiche. Ragazzo di una tribù di lingua Ari nell'alta Omo Valley in Etiopia. Il suo genoma ha strette affinità con quelle di un uomo vissuto 4500 anni fa nella stessa area.

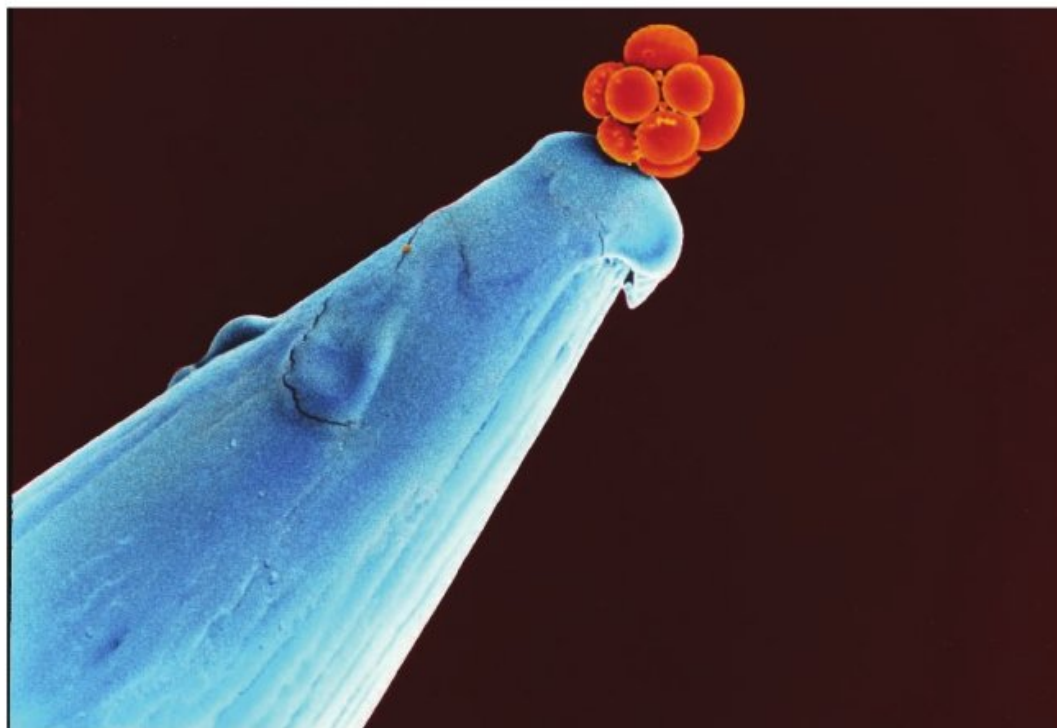
zioni della Sardegna, a loro volta ritenute in forte continuità genetica con gli uomini del Neolitico.

Questo suggerisce, anzi dimostra, che nella preistoria recente ci fu un'estesa migrazione in senso inverso rispetto a quello che siamo di solito abituati a pensare - non dall'Africa, ma verso l'Africa - che interessò le popolazioni di quel continente, prima che ulteriori vicende ne oscurassero gli effetti. Fu la diffusione degli agricoltori provenienti dalla cosiddetta «mezzaluna fertile» del Vicino Oriente: gli uomini del Neolitico. Nessuno poteva sapere che questa diffusione ebbe effetti così nitidi e profondi, dal Corno d'Africa giù giù fino alla regione del Capo. Tutto questo da un singolo genoma africano di 4500 anni fa.

POLITICHE DELLA RICERCA

Modificare la linea germinale?

Le conclusioni di un incontro internazionale sull'uso della tecnica CRISPR



Si può fare.

Embrione umano allo stadio in cui è composto da 16 cellule. Un gruppo di ricerca cinese ha dimostrato che è possibile modificare il patrimonio genetico di embrioni umani con la tecnica CRISPR, innescando un acceso dibattito.

«L'impensabile è diventato concepibile». Così ha esordito David Baltimore, del California Institute of Technology di Pasadena, che ha presieduto lo scorso dicembre l'International Summit on Human Gene Editing, che ha visto discutere per tre giorni oltre 400 scienziati, eticisti e altri esperti alla National Academy of Sciences (NAS) a Washington, DC.

Fra loro i tre pionieri, in odore di Nobel, della tecnica che più ha cambiato le carte in tavola: la CRISPR, eletta da «Science» scoperta dell'anno, che permette di introdurre in un genoma le mutazioni desiderate con inedita precisione e facilità, e a basso costo. Così la gamma di usi cresce in fretta. Già quelli su animali – come zanzare rese incapaci di trasmettere la malaria, e che se liberate diffonderebbero a ritmi esplosivi i loro geni – hanno suscitato polemiche e inviti alla cautela. Ma a Washington si dibattevano le applicazioni forse più inquietanti: quelle sull'essere umano.

Finché la si usa per modificare cellule somatiche, la CRISPR non pone dilemmi: è solo uno strumento più sofisticato di terapia genica, gestibile con la regolamentazione esistente. È già stata usata, per esempio, per eliminare dai leucociti di persone con HIV il recettore del virus CCR5, e si sperimenterà per modificare il gene dell'emoglobina in malati di anemia falciforme o di beta talassemia. Tutt'altra storia è modificare la linea germinale umana, introducendo nei gameti o nell'embrione mutazioni che saranno

trasmesse ai figli ed entreranno nel patrimonio genetico dell'umanità. La sola possibilità aveva fatto discutere. Quando poi pochi mesi fa un gruppo cinese ha annunciato di averlo fatto (come mera sperimentazione, su embrioni incapaci di svilupparsi), la NAS e altre tre società scientifiche di Stati Uniti, Regno Unito e Cina hanno convocato il summit.

Il dibattito sui principi ha discusso le possibili motivazioni, dalla correzione di difetti genetici alla produzione di umani «superiori» per intelligenza o nel fisico, e ha visto contrapporsi molte sfumature, da chi consentirebbe quasi tutto a chi bloccherebbe anche le ricerche di base. Ma nei fatti il consenso è che la tecnica non è ancora sicura: per quanto precisa, introduce ancora troppe mutazioni indesiderate. Resta poi un problema più di fondo: manipolando i geni si interferisce con meccanismi genetici ancora poco compresi, specie per caratteri complessi come quelli cognitivi, con effetti su grande scala non prevedibili.

Perciò, ha concluso il summit, il *gene editing* va promosso nella ricerca, anche su embrioni e linea germinale, e per le applicazioni somatiche. Ma non per modificare la linea germinale di un nascituro, almeno finché non sarà affidabile e regolata da un dibattito sociale esaustivo e da una normativa adeguata, auspicabilmente armonizzata a livello internazionale.

Giovanni Sabato

ASTROFISICA

Il meteo del nucleo galattico attivo

Gli anelli di materia attorno a buchi neri supermassicci non sono sempre compatti e omogenei

Lo spesso e denso anello di materia che circonda i buchi neri supermassicci che si trovano al centro delle galassie attive non è compatto e omogeneo come ipotizzato finora. In particolare, le osservazioni dimostrano che il toro di gas che si trova nel nucleo galattico attivo di NGC 1068, una galassia a spirale simile alla nostra, distante 47 milioni di anni luce in direzione della costellazione della Balena, ha un aspetto granuloso e non uniforme. Lo afferma un gruppo di astronomi guidato da Andrea Marinucci, dell'Università degli Studi Roma Tre e associato all'Istituto nazionale di astrofisica, che ha pubblicato i risultati delle proprie ricerche su «Monthly Notices of the Royal Astronomical Society Letters».

Marinucci e collaboratori hanno analizzato i dati raccolti nell'arco degli ultimi due anni da due telescopi spaziali per raggi X, XMM-Newton dell'Agenzia spaziale europea e NuSTAR della NASA. In generale si pensa che la struttura a ciambella che avvolge il buco nero centrale nasconda alla vista l'intensa radiazione emessa dal nucleo attivo nel processo di accrescimento del buco ne-

ro. Tanto che nemmeno la radiazione più penetrante, come appunto i raggi X prodotti dalle zone più calde del gas in caduta libera verso il buco nero, può attraversare quella spessa coltre di materia.

Ma ad agosto 2014 gli astronomi hanno rilevato un picco di luminosità nei raggi X ad alta energia proveniente proprio dal nucleo galattico attivo di NGC 1068. L'interpretazione è che questa radiazione X, proprio perché particolarmente energetica, sia riuscita a farsi strada attraverso il toro di materia a causa di una temporanea «schiarita» nella altrimenti spessa coltre di nubi di materia gassosa e molecolare che oscura il buco nero centrale.

L'osservazione conferma alcune ricerche precedenti secondo cui non tutti i tori di materia attorno ai buchi neri supermassicci hanno una struttura compatta e omogenea come prima ipotizzato. Resta tuttavia da capire come si possano creare queste temporanee riduzioni dello spessore del materiale: se turbolenze interne o disturbi prodotti da materiale in caduta proveniente dall'esterno del toro.

Emiliano Ricci



Primi inediti risultati da Chang'e-3

A due anni dall'arrivo della missione cinese Chang'e-3 sulla Luna ecco i primi dati che, pubblicati su «Nature Communications», danno informazioni diverse rispetto a quelle raccolte nelle missioni precedenti, rivelando che il mantello lunare è molto più eterogeneo di quello della Terra. Sceso nella parte nord del bacino Imbrium, in prossimità di un cratere creato da un impatto recente che ha scavato nel materiale superficiale e messo in evidenza il substrato roccioso, il rover Yutu di Chang'e-3 è nella posizione ottimale per confrontare i dati della superficie con quelli di misure orbitali. Misure che spesso si rifanno alla composizione del regolite, costituito da materiale misto e quindi di difficile interpretazione.

Yutu ha così potuto analizzare basalti di meno di tre miliardi di anni fa, più recenti di quelli studiati dalle storiche missioni Apollo, degli Stati Uniti, e Luna, dell'Unione Sovietica. Mentre quelle



missioni avevano trovato concentrazioni di titanio molto alte o molto basse, Chang'e-3 ne ha rilevato concentrazioni intermedie. La correlazione tra composizione ed età dei basalti permette di capire come sia cambiato nel tempo il vulcanismo della Luna. Secondo la teoria più accreditata, il nostro satellite si è formato a partire dall'impatto della

Terra con un corpo planetario delle dimensioni di Marte che ha dato origine a una massa fusa o semifusa che, solidificando, si è separata in crosta, mantello e nucleo in un processo di separazione dei minerali per cristallizzazione. I minerali solidificarono in un certo ordine, a partire dai più densi, che affondano prima nel magma. L'ultimo è stato l'ilmenite, ricco in titanio, che solidificò quando appena il 5 per cento del magma era ancora fuso, rimanendo quindi più in superficie.

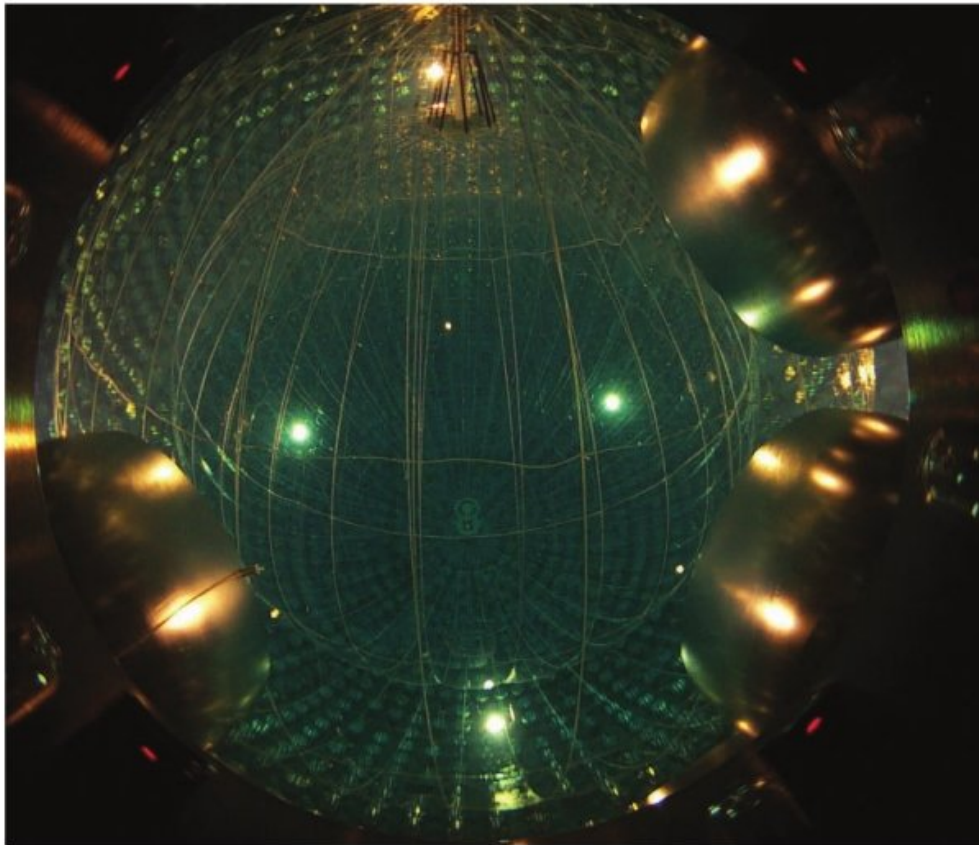
Trovare quindi titanio a diversa profondità del mantello lunare, in rocce che risalgono a diverse epoche, suggerisce che il processo di solidificazione del mantello sia stato disturbato da qualche evento che i ricercatori tentano di spiegare: un'ipotesi è che si siano verificati grandi impatti con asteroidi quando la superficie era ancora un oceano di magma.

Giulia Alice Fornaro

FISICA

Lunga vita all'elettrone

La vita media di questa particella è quasi venti volte più grande dell'età attuale dell'universo



La vita dell'elettrone ha una durata temporale almeno 19 ordini di grandezza più lunga di quella dell'universo, la cui età è pari a 13,8 miliardi di anni. A sostenerlo, in un articolo pubblicato su «Physical Review Letters», sono i fisici della collaborazione internazionale che lavora all'esperimento Borexino, ospitato presso i Laboratori nazionali del Gran Sasso dell'Istituto nazionale di fisica nucleare (INFN). Secondo la stima dei ricercatori, infatti, il tempo di decadimento di un elettrone è pari o superiore a 66 miliardi di miliardi di miliardi di anni (6,6 per 10 alla 28 anni).

Il modello standard delle particelle elementari descrive l'elettrone come la particella dotata di carica elettrica con massa tra le più piccole. Un suo eventuale decadimento porterebbe alla creazione di particelle di massa ancora più piccola, che, tuttavia, proprio perché meno massicce dell'elettrone, dovrebbero essere necessariamente prive di carica elettrica. Un processo di questo tipo rappresenterebbe quindi una violazione del principio di conservazione della carica elettrica. Il risultato ottenuto dalla collaborazio-

ne Borexino, oltre a migliorare di un fattore 100 la precisione della stima precedente, che risaliva al 1998, fornisce quindi un'importante conferma sperimentale di questo principio, la cui violazione metterebbe in crisi il modello standard, aprendo la strada alla formulazione di una nuova fisica.

Per arrivare alla stima di questo valore limite, i ricercatori dell'esperimento Borexino – un grande rivelatore a scintillazione inizialmente progettato per rilevare i neutrini solari – hanno raccolto dati per oltre un anno, andando a cercare tracce di un particolare tipo di decadimento ipotetico: quello che vedrebbe decadere l'elettrone in un neutrino elettronico e in un fotone con energia pari alla metà della massa a riposo dell'elettrone.

Contando il numero di giorni trascorsi senza osservare decadimenti e stimando il numero di elettroni presenti nel rivelatore, i ricercatori hanno dedotto con metodi statistici la vita media dell'elettrone. Un risultato che può comunque essere ulteriormente migliorato.

Emiliano Ricci

Il mistero dei lampi radio veloci

Il primo lampo radio veloce è stato annunciato nel 2007, grazie all'analisi dei dati raccolti dal radiotelescopio di Parkes, in Australia. A scoprirlo, un gruppo guidato da Duncan Lorimer, della West Virginia University. Da quel momento, di questi lampi, o FRB (da *fast radio bursts*), rilevati come deboli segnali radio della durata di alcuni millisecondi, ne sono stati osservati altri. Recenti studi gettano ora nuova luce sui possibili meccanismi all'origine dei FRB. Basandosi sulla distribuzione e la frequenza di questi lampi, le ipotesi più accreditate sono due: collisioni fra stelle degeneri (nane bianche o stelle di neutroni) o, in alternativa, esplosioni (*outburst*) in giovani pulsar o magnetar, stelle di neutroni con intensi campi magnetici. Secondo lo studio pubblicato su «Nature» da Kiyoshi Masui, dell'Università della British Columbia, la dispersione delle onde radio emesse da uno di questi FRB permette di stimare la distanza della sorgente: oltre sei miliardi di anni luce da noi. Gli FRB sarebbero dunque di origine extragalattica. L'analisi della polarizzazione pone la sorgente immersa in una nube di gas denso e magnetizzato, come un resto di supernova o una nebulosa di formazione stellare. Questa, assieme ad altre due ricerche, sembra puntare verso l'ipotesi dell'*outburst*.

Emiliano Ricci

CLIMATOLOGIA

Quando il Nord Europa si raffreddò

Il raffreddamento intenso avvenne circa 13.000 anni fa, mentre il resto del mondo si riscaldava



Ricordate il film apocalittico *The day after tomorrow*? In quel caso, nonostante il riscaldamento globale, l'emisfero nord era andato incontro a una glaciazione improvvisa e devastante! Ovviamente si tratta di finzione cinematografica, ma qualcosa del genere, sia pure in misura molto più ridotta, è avvenuta realmente.

Circa 12.900 anni fa la Terra stava uscendo dall'ultima era glaciale. Mentre tutto il mondo si riscaldava, isole britanniche e Scandinavia hanno sperimentato un raffreddamento intenso che si è protratto per circa 1400 anni. Che cosa è successo? Si pensa a un blocco della circolazione oceanica che portava (e porta ancora oggi) acqua calda dall'equatore al Polo Nord, trasferendovi calore. Questo sarebbe dovuto alla fusione dei ghiacci alla latitudine del Nord Europa.

Ora Hans Renssen, dell'Università di Amsterdam, e colleghi hanno analizzato meglio la situazione, pubblicando uno studio su «Nature Geoscience». Hanno ricostruito la situazione climatica precedente a questo evento in alcuni modelli climatici e hanno poi indotto una fusione dei ghiacci, che ha effettivamente portato al

blocco della circolazione oceanica. Gli scienziati hanno però osservato chiaramente che questo conduceva a una diminuzione della temperatura molto più grande di quella avvenuta nella realtà.

Con la rappresentazione fisica del clima nei modelli, Renssen e colleghi hanno allora potuto vagliare il contributo di altre cause esterne. In particolare hanno studiato l'impatto di un'eventuale diminuzione della radiazione che colpisce la Terra (per decrescita dell'emissione solare o per l'impatto di un grosso meteorite che avrebbe alzato polveri e oscurato il Sole) insieme con la fusione dei ghiacci. Questo porta anche a cambiamenti sostanziali nelle correnti atmosferiche e permette di ricostruire molto meglio la temperatura di questo evento freddo.

La lezione fondamentale che si può trarre dallo studio è che, se si vogliono ricostruire o prevedere bene eventi di cambiamento climatico brusco, questi vanno valutati considerando la complessità del sistema e non un'unica causa di possibile cambiamento. E con i modelli climatici possiamo farlo.

Antonello Pasini

A rischio i fringuelli di Darwin

Gli uccelli che ispirarono a Darwin la teoria dell'evoluzione rischiano l'estinzione per colpa di una mosca parassita (*Philornis downsi*) introdotta nell'arcipelago delle Galàpagos negli anni sessanta, le cui larve si nutrono del sangue di uccelli non ancora usciti dal nido provocandone la morte. A lanciare l'allarme è un gruppo di ricerca coordinato da Dale Clayton dell'Università dello Utah in uno studio pubblicato sul «Journal of Applied Ecology».

Dal 2008 al 2013, i ricercatori hanno seguito l'andamento della popolazione di una specie di fringuello (*Geospiza fortis*) nell'isola di Santa Cruz e, sulla base dei dati raccolti (che considerano le dinamiche demografiche di questi uccelli e i danni causati dalla mosca parassita), hanno elaborato modelli matematici per descrivere i possibili scenari evolutivi della specie. Le previsioni non sono buone: questi fringuelli rischiano l'estinzione in poche decine di anni (50 se condizioni ambientali sfavorevoli aggravano i danni della mosca; 80-90 se la natura dà una mano). Ma non tutto è perduto. La scomparsa della specie potrebbe essere scongiurata riducendo la popolazione della mosca del 40 per cento. In che modo? Introducendo maschi sterili o vespe parassite delle mosche, allevando i piccoli in cattività o usando opportuni insetticidi.

Martina Saporiti

MEDICINA

Le cause del cancro

Una controanalisi quantitativa smentisce il ruolo della «sfortuna» nell'insorgenza dei tumori

Non è una pura questione di sfortuna: il rischio di cancro dipende al 70-90 per cento da agenti ambientali come inquinanti e radiazioni, e solo per il 10-30 per cento da fattori intrinseci su cui si può fare poco. C'è quindi molto spazio per la prevenzione, e non solo per diagnosi precoci e cure più efficaci.

Lo ha affermato su «Nature» un gruppo di oncologi, patologi e statistici guidato da Yusuf Hannun alla Stony Brook University, nello Stato di New York, in esplicita risposta a uno studio pubblicato su «Science» a inizio 2015 che rimarcava invece il ruolo dei fattori intrinseci. In quella ricerca, Cristian Tomasetti, della Johns Hopkins University di Baltimora, esaminava la differenza di rischio tra i vari tessuti, mostrando che dipende soprattutto dal numero totale di divisioni cellulari nel normale rinnovamento di ciascun tessuto.

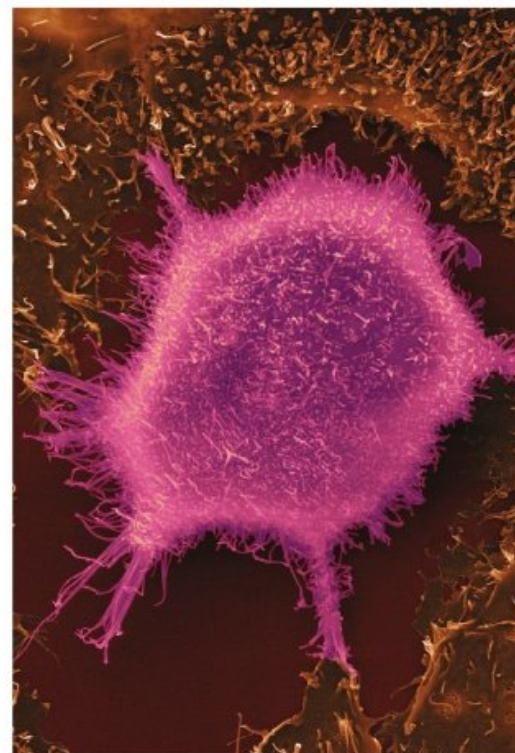
Di qui concludeva però che fattori ambientali e genetici hanno un ruolo modesto nella genesi tumorale, dovuta il più delle volte alla «sfortuna» delle mutazioni casuali che avvengono durante la replicazione cellulare. Le ovvie eccezioni, come gli effetti del fumo sul pol-

mone, spiegherebbero solo una minoranza dei tumori complessivi.

Questa interpretazione aveva sollevato critiche accese e ben argomentate, sottolinea Hannun, ma non una controanalisi quantitativa dello stesso tenore. Con una sfilza di calcoli e modelli, quindi Hannun ha riesaminato prima i dati stessi del lavoro originario, e poi vi ha aggiunto molti altri dati epidemiologici (per esempio sui migranti che acquisiscono i rischi dei luoghi in cui si trasferiscono) e sulle mutazioni tumorali (quelle prodotte da certi mutageni sono diverse da quelle intrinseche).

Lo scienziato ha ripreso così vari argomenti già sollevati, come appunto le disparità geografiche di incidenza tumorale, ma analizzandoli a livello quantitativo con vari modelli teorici. Ha incluso inoltre due tumori frequenti, del seno e della prostata, non considerati da Tomasetti. Ed è giunto a una conclusione opposta: le mutazioni spontanee, anche nei tessuti ad alta proliferazione, di rado bastano a rendere una cellula tumorale, e quasi sempre occorre anche un'esposizione ambientale.

Giovanni Sabato



L'evoluzione del ribosoma e l'alba della biochimica



Il ribosoma è l'organello che converte l'informazione genetica in proteine. Struttura antichissima, comune a tutti gli organismi viventi, è anche una memoria unica dell'origine della vita sulla Terra, un giacimento fossile molecolare. Sui «Proceedings of the National Academy of Sciences», Loren Williams e colleghi del NASA Astrobiology Institute presentano ora un modello dell'evoluzione del ribosoma che scava fino a 3,8 miliardi di anni fa, all'epoca in cui nacquero le prime cellule. Confrontando l'RNA ribosomiale, lo «scheletro» di acidi nucleici che forma gran parte del ribosoma, di 133 organismi, Williams e colleghi hanno dedotto che si è evoluto in sei fasi. Come gli anelli di un tronco d'albero crescono attorno ai precedenti, così in ogni fase si è aggiunto uno «strato» nuovo di RNA, che si è inserito nel precedente mantenendo intatta la struttura sottostante. Ogni aggiunta ha fornito una nuova funzione: il modello di Williams è profondamente darwiniano, in cui a ogni passo corrisponde un chiaro vantaggio evolutivo. Secondo il modello, il ribosoma ancestrale non era che una piccola elica stabile di RNA. La seconda fase ha aggiunto all'RNA la capacità di assemblare amminoacidi e formare i primi peptidi. Alcuni di questi peptidi si uniscono al ribosoma, proteggendolo. Nella terza fase le due subunità del ribosoma sono diventate capaci di associarsi e la costruzione dei peptidi inizia a essere guidata da un primitivo codice genetico. Da qui in poi l'RNA del ribosoma diventa sempre più raffinato, capace di costruire proteine sempre più lunghe e in modo sempre più accurato, trasformandosi nel preciso traduttore di informazione genetica oggi condiviso dai viventi. La coevoluzione di RNA e proteine nelle ultime fasi dello sviluppo del ribosoma avrebbe infine dato l'avvio alla biochimica cellulare come la conosciamo, in cui le proteine fanno da padrone. L'analisi delle fondamenta antiche del ribosoma in futuro potrebbe dirci qualcosa sulle caratteristiche chimiche e fisiche dell'ambiente in cui è nata la vita.

Massimo Sandal

Insetti, batteri e relazioni sociali



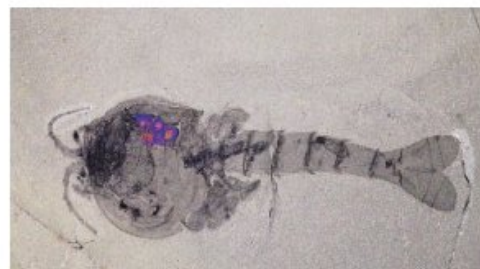
Gli insetti, come tanti animali, comunicano tramite sostanze volatili, i feromoni, che veicolano segnali quali il richiamo sessuale o lo stimolo ad aggregarsi in gruppi sociali. Ma i feromoni dell'aggregazione sociale non erano mai stati individuati: i vari studi davano risultati discordi. Coby Schal, entomologo della North Carolina State University a Raleigh, ne rivela ora il motivo sui «Proceedings of the National Academy of Sciences», studiando lo scarafaggio *Blattella germanica*: i feromoni dell'aggregazione sono acidi grassi prodotti dai batteri intestinali e rilasciati con le feci. E poiché la flora batterica cambia con dieta, ambiente e altri fattori, anche la combinazione di questi composti, detti acidi carbossilici volatili, probabilmente cambia un po' fra le varie comunità, contribuendo alla loro coesione. Se uno scarafaggio è allevato in assenza di batteri, le sue feci attirano poco i consimili, mentre reintroducendovi i batteri si ripristina la sua attrattiva sociale. Data la forza attrattiva di questi composti, Schal ora ne studia l'uso come esca per la deblattizzazione. E meccanismi simili sembrano all'opera in molte altre specie, anche di mammiferi. (GiSa)

Il lato oscuro del proteoma

Sappiamo poco o nulla di metà delle proteine registrate nelle banche dati. È il risultato di una mappa del proteoma «oscuro», sviluppata da una collaborazione internazionale coordinata da Seán I. O'Donoghue dell'Università di Sidney, e pubblicata sui «Proceedings of the National Academy of Sciences». Confrontando le proteine note dal sequenziamento dei genomi, circa 546.000, con quelle di cui conosciamo la struttura, possiamo prevedere in modo ragionevole conformazione tridimensionale, e quindi funzione molecolare di almeno l'80 per cento delle proteine batteriche. Ma in eucarioti (piante, animali, funghi) e virus, quasi il 50 per cento delle proteine è ancora un enigma.

Spesso queste proteine «oscu» rappresentano innovazioni evolutive, specifiche per una o poche specie, ai margini della rete molecolare dell'organismo. L'analisi mostra che molte proteine «oscu» sono probabilmente prodotte da ghiandole e agiscono quindi fuori dalla cellula. Questo implica una serie di caratteristiche peculiari che rendono più difficile risolverne la struttura. La mappa del proteoma oscuro è una guida ai mattoni mancanti di un modello molecolare completo dei viventi, fondamentale per concentrare gli sforzi di biologi e bioinformatici nello scoprire nuovi processi biologici. (MaSa)

Prime cure parentali



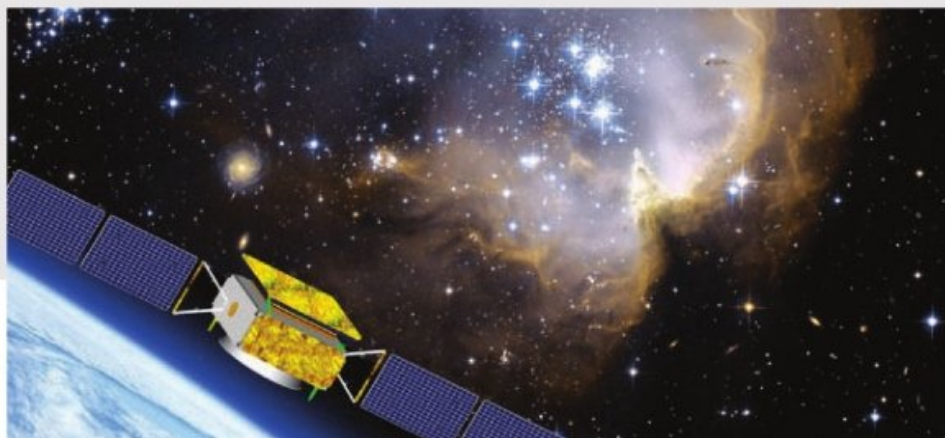
Le cure parentali sono uno degli adattamenti di maggior successo, ma quali sono stati i primi organismi a sviluppare una forma rudimentale di accudimento dei propri piccoli? Le strategie per migliorare le probabilità di sopravvivenza della prole, secondo un articolo pubblicato su «Current Biology» da Jean-Bernard Caron dell'Università di Toronto, sono comparse molto presto nella storia della vita: oltre 500 milioni di anni fa assieme alle prime forme pluricellulari.

Le conclusioni arrivano con la scoperta di alcuni fossili di *Waptia fieldensis*, un antichissimo artropode che proteggeva le proprie uova nascondendole sotto il carapace. Poche uova, non più di 24, e di circa due millimetri di diametro, lo distinguevano da altri artropodi dell'epoca che invece deponevano centinaia di uova di dimensioni inferiori ai 0,15 millimetri. Secondo gli autori dello studio, *W. fieldensis* rappresenta un altro tassello utile alla comprensione di un'epoca di rapido sviluppo evolutivo. (MaMa)

A caccia di materia oscura nei raggi cosmici

La ricerca della materia oscura ha un nuovo alleato: il satellite DAMPE (da DArk Matter Particle Explorer). Frutto di una collaborazione internazionale di cui fanno parte l'Istituto nazionale di fisica nucleare e l'Accademia cinese delle scienze, oltre ad alcune università italiane e svizzere, il satellite è stato lanciato il 17 dicembre scorso da una base cinese a bordo del vettore Long March 2D e messo in orbita a 500 chilometri di quota. L'esperienza maturata nello studio delle astroparticelle ha permesso al nostro paese di contribuire in modo significativo alla missione, in particolare con lo sviluppo del rivelatore al silicio per il tracciamento di precisione dei raggi cosmici. Il satellite monta infatti a bordo quattro strumenti con cui è in grado di tracciare e misurare l'intensità dei flussi non solo di elettroni e fotoni ad altissima energia, ma anche di differenziare i vari nuclei atomici presenti nella radiazione cosmica.

L'obiettivo di DAMPE è migliorare la comprensione dell'origine dei raggi cosmici ad alta energia e dei relativi meccanismi di accelerazione e propagazione, ma soprattutto individuare la materia oscura attraverso lo studio delle particelle ordinarie rilevate dagli strumenti di DAMPE, come, per esempio, i fotoni dei raggi gamma che potrebbero originare dall'annichilazione di particelle di materia oscura. (EmRi)



Pappagalli «macinatori»



Tre su 400. Queste le specie di pappagalli che fino a oggi godevano dello status di *tool users*, animali capaci di usare strumenti. Alla lista se ne aggiunge una quarta, con un'abilità eccezionale.

Con uno studio effettuato in cattività, ricercatori dell'Università di York e dell'Università di St Andrews hanno dimostrato che il vasa maggiore (*Coracopsis vasa*), un pappagallo del Madagascar, usa piccoli sassi o semi di frutti per «grattare» via la polvere di calcio da conchiglie o spezzarle in frammenti in modo da ingerirle facilmente (le conchiglie sono fonte di calcio per gli uccelli). Questo comportamento, come si legge su «Biology Letters», non era mai stato osservato in questi uccelli, così come è la prima volta che l'uso di strumenti per «macinare» è osservato in una specie diversa dalla nostra. Non solo: alcuni esemplari si scambiavano gli strumenti tra loro, una delle rarissime volte che una condivisione diretta di utensili è stata descritta per un animale diverso dall'essere umano. (MaSa)

Controllare la luce grazie alla luce

Ricercatori del Consiglio nazionale delle ricerche hanno usato la luce per plasmare un metamateriale che funziona come un dispositivo ottico reversibile e riconfigurabile. Lo studio, tutto italiano, è apparso su «Scientific Reports» e apre nuove possibilità alle tecnologie che usano la radiazione terahertz, per la quale, nonostante le enormi potenzialità, non sono disponibili ottiche compatte di alta qualità.

I metamateriali sono strutture periodiche più piccole della lunghezza d'onda della luce con cui interagiscono, in cui si alternano elementi con indice di rifrazione molto diverso, in grado quindi di riflettere la luce diversamente. I ricercatori hanno ricreato questa struttura proiettando su un substrato di silicio un fascio laser diviso in fascetti con spaziature variabili tra 15 e 80 micrometri. La conseguente eccitazione di cariche libere, nelle aree colpite dal laser, ha aumentato localmente la conduttività del silicio, cambiando quindi anche l'indice di rifrazione. Il materiale risultante è stato in grado di modulare l'emissione di un laser che emette nel terahertz. Il processo è reversibile: allo spegnimento del primo laser le cariche tornano allo stato di energia originario. Cambiando inoltre intensità e geometria dell'illuminazione laser si può modulare a piacimento la risposta ottica del materiale. (Gifo)

Riconoscere le infezioni virali

Contro le infezioni virali, responsabili di molte morti ogni anno, non c'è un'unica arma di difesa. L'attuale approccio prevede l'uso di farmaci specifici per ciascun ceppo virale, ma può rivelarsi inefficiente a causa dell'alto tasso di mutazioni presente nei virus. Conoscere la risposta dell'ospite all'infezione potrebbe fornire gli strumenti per sviluppare farmaci antivirali ad ampio spettro, suggerisce ora lo studio di ricercatori della Stanford University.

Il gruppo ha identificato uno schema di attivazione genica

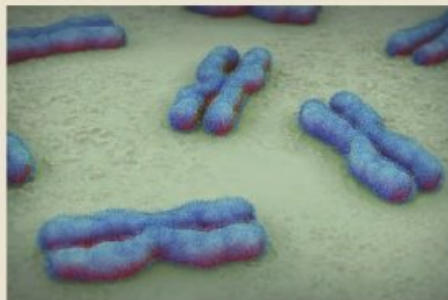


caratteristico delle persone affette da un'infezione respiratoria, che le distingue sia dagli individui sani sia dai pazienti colpiti da infezioni batteriche. Usando banche dati pubbliche di materiale biologico e sfruttando così la diversità del campione, i ricercatori hanno studiato il modo in cui le particelle virali modificano l'espressione genica delle cellule del sistema immunitario nelle persone infette. La «firma» lasciata dai virus, che può essere osservata ancora prima che il paziente mostri i primi sintomi, permette anche di distinguere in modo specifico l'influenza dalle altre infezioni respiratorie. Il metodo potrebbe anche essere usato per indicare se una persona ha sviluppato l'immunità dopo una vaccinazione. (VaDa)

Dalla terapia genica a quella cromosomica?

Dalla terapia genica a quella cromosomica? È questa la strada aperta dai genetisti Paolo Vezzoni, Anna Villa e Marianna Paulis dell'Istituto di ricerca genetica e biomedica del Consiglio nazionale delle ricerche a Milano e dell'Istituto clinico Humanitas di Rozzano, coadiuvati da Franco Lucchini, dell'Università Cattolica di Cremona, e Cesare Galli, di Avantea.

Come riferiscono su «Oncotarget», i ricercatori hanno sostituito in cellule embrionali di topo l'intero cromosoma X, per eliminare una mutazione che porta alla sindrome di Lesch-Nyhan, facendo nascere topi sani. «L'inserimento del cromosoma nelle cellule è avvenuto grazie a microsfele di lipidi che attraversano la membrana», spiega Vezzoni. «Per poter poi selezionare le cellule in cui il nuovo cromosoma era stato incorporato correttamente e quello difettoso espulso, evento che forse avviene durante la duplicazione cellulare, abbiamo usato un terreno di coltura che uccide le cellule contenenti ancora la mutazione dannosa. Questa tecnica si può usare anche per sostituire cromosomi X contenenti altri difetti genetici, introducendo in essi anche la



mutazione che porta alla Lesch-Nyhan». La scelta del cromosoma X non è casuale: poiché nei maschi si trova una sola copia, da questo cromosoma hanno origine molte malattie genetiche, come l'emofilia o la distrofia di Duchenne.

Ed è su quest'ultima che Vezzoni e colleghi intendono ora sperimentare la nuova tecnica. «La Duchenne è causata da un gene troppo grande per poter essere sostituito. L'idea sarebbe quindi introdurre nei muscoli del paziente sue cellule staminali corrette con un intero cromosoma X sano». (AlSa)

INTERNET

L'era della (dis)

L'espansione dei social media ha un lato oscuro, ovvero la diffusione pervasiva e senza freni di informazioni false e teorie del complotto, che potrebbe mettere a rischio la società

di Walter Quattrocioni

informazione



Frank Rumpenhorst/gpa/Corbis

Il complotto dei complotti.

Scie di condensazione formatesi dopo il passaggio di aerei sul cielo di Francoforte.

In una delle teorie complottiste più popolari, quella delle scie chimiche, le scie di condensazione contengono sostanze chimiche o biologiche la cui presenza è volutamente nascosta alla popolazione.

Walter Quattrocchi coordina il Laboratorio di computational social science all'Istituto IMT Alti Studi di Lucca. I suoi studi si concentrano sulla caratterizzazione quantitativa delle dinamiche sociali, spaziando dalla dinamica delle opinioni alla diffusione delle informazioni, con enfasi su nascita, fruizione e diffusione delle narrative *on line* e contagio sociale.



Vi è mai capitato di essere a cena con amici o familiari, magari anche con un certo livello di istruzione, e che l'argomento di conversazione fosse centrato sull'ultima notizia letta su Internet, per esempio su come il cambiamento climatico sia indotto dalle scie chimiche o sui vantaggi della medicina alternativa? Oppure seguire in televisione argomentazioni di noti comici o cantanti, senza le più basilari nozioni di statistica o economia, diventati all'improvviso fini analisti economico-politici che palesano quanto signoraggio bancario e Nuovo Ordine Mondiale stiano attentando alla società?

Che cosa è cambiato nel nostro modo di informarci e quindi di costruirci un'opinione? Quale ruolo hanno i *social media* nella diffusione e nella popolarità di tesi alternative e complottiste?

La scienza se ne sta occupando. Di recente sono state sviluppate tecniche che hanno permesso di studiare le dinamiche sociali a un livello di risoluzione elevato sfruttando la grande mole di dati dei social media. Inoltre in un rapporto del 2013 sui rischi globali il World Economic Forum, un'organizzazione internazionale indipendente che discute i problemi più pressanti del mondo, mostra che uno dei temi più interessanti e allo stesso tempo tra i più pericolosi per la società, al pari del terrorismo, riguarda la viralità legata a informazioni infondate o false.

Il Web ha cambiato il modo in cui le persone si informano, interagiscono tra loro, trovano amici, argomenti e comunità di interesse, filtrano informazioni e formano le proprie opinioni. Questo scenario, unito all'analfabetismo funzionale, ovvero l'incapacità di comprendere efficacemente un testo (in Italia riguarda quasi la metà della popolazione tra i 15 e i 65 anni, secondo l'Organisation for Economic Cooperation and Development, OECD) e all'esposizione selettiva dei contenuti, guidata principalmente dal pregiudizio di conferma (il cosiddetto *confirmation bias*) a determinati contenuti può creare veri e propri fenomeni di massa attorno a informazioni false.

Dallo studio anatomico di queste dinamiche sociali emergono sia un quadro allarmante sia una inadeguatezza di fondo delle soluzioni, in particolare quelle algoritmiche e meccaniche, pensate per arginare la formazione, diffusione e rinforzo di narrative fasulle, o *misinformation*.

Nel 2009 David Lazer della Harvard University e colleghi hanno pubblicato su «Science» l'articolo *Computational Social Science*, che ha sancito la nascita del nuovo campo di ricerca. Tramite un approccio basato sui dati, questa disciplina tende a unire matematica, statistica, fisica, sociologia e informatica, e ha lo scopo di studiare i fenomeni sociali in maniera quantitativa sfruttando le tracce digitali che lasciamo sui vari social media come Facebook, Twitter, YouTube e così via.

Gli utenti nel cyberspazio selezionano, condividono, commentano e lasciano traccia delle proprie azioni; questo ha reso possibile lo studio della società a un livello di risoluzione senza precedenti, che va molto oltre la mera e pura speculazione. Lungo questa linea sono stati fatti notevoli progressi riguardo alla comprensione della diffusione e del consumo delle informazioni, del loro effetto sulla formazione delle opinioni e su come le persone si influenzino a vicenda.

A ciascuno il suo

Come accennato, nel 2013 il World Economic Forum ha catalogato la diffusione massiva di informazioni fasulle (*massive digital misinformation*) come una delle minacce più serie per la società. Questo dipende principalmente dal fatto che nel Web il paradigma di produzione e consumo dei contenuti è fortemente disintermediato. Tutti possono pubblicare la loro versione e opinione su qualunque tematica, senza che poi ci sia un'effettiva verifica sulla fondatezza o quantomeno sulla sostenibilità di quello che è stato pubblicato.

I contenuti fruibili sono prodotti dagli stessi fruitori e la veridicità

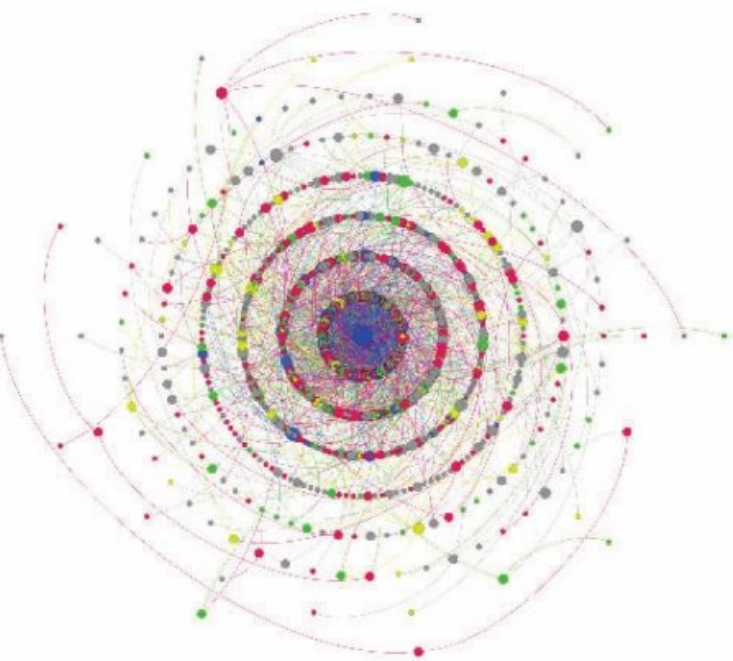
IN BREVE

I social media sono una straordinaria opportunità per la libertà di informazione, ma hanno anche un lato oscuro: la diffusione incontrollata di tesi complottiste e pseudoscientifiche, definita dal

World Economic Forum uno dei rischi principali per la società. **La mole di dati disponibili** rende possibile lo studio della diffusione della disinformazione a un livello di risoluzione senza precedenti.

Gli studi mostrano che la selezione dei contenuti avviene per pregiudizio di conferma, portando alla formazione di gruppi solidali su specifici temi che tendono a rinforzarsi e ignorare tutto il resto.

Inoltre i complottisti sono refrattari al debunking. Questo contesto rende di fatto molto difficile informare correttamente, di conseguenza fermare una notizia infondata diventa praticamente impossibile.



La diffusione della bufala del senatore Cirenga.

I nodi sono gli utenti, gli archi rappresentano la relazione di condivisione. Al centro c'è l'origine, poi i livelli di diffusione. I colori indicano la polarizzazione dell'utente, ovvero la preferenza per uno specifico contenuto: in giallo utente che segue fonti *main stream*, in verde discussione politica, in rosso fonti alternative, in blu i troll.

cità come anche l'utilità delle informazioni sono asservite alle necessità del singolo utente che cerca spesso conferme coerenti a un suo sistema di credenze già strutturato e consolidato.

Su Facebook proliferano le pagine su megacomplotti mondiali, scie chimiche, signoraggio bancario, correlazione tra vaccini e autismo, diete fruttariane, fino alle mirabolanti teorie sull'energia infinita che ci viene «astutamente» tenuta nascosta dalle grandi multinazionali a tutela dei loro interessi finanziari.

Nonostante la speculazione positivista basata sull'assunto dell'essere umano razionale, lo studio quantitativo di questi fenomeni ha accesso spie in direzione contraria. In un contesto informativo non filtrato, l'essere umano prende tutto ciò che più gli aggrada ed è conforme al proprio pensiero (confirmations bias, appunto) alimentando la proliferazione di argomentazioni strampalate che vanno a sostegno delle narrazioni più disparate. Per esempio, nel caso della narrazione fruttariana si sostiene che i nostri antenati non fossero onnivori ma frugivori, nonostante prove empiriche e pitture rupestri indichino l'esatto contrario. Per non parlare di altre leggende metropolitane come i microchip sottocutanei o i finti sbarchi sulla superficie della Luna che sono gli argomenti forti di noti parlamentari.

Questo scenario, così fortemente disintermediato e guidato dai gusti di massa, è in grado di generare fenomeni virali su vasta scala che influiscono notevolmente sulla percezione pubblica di questioni anche importanti come salute, politica economica, geopolitica. E può causare fenomeni bizzarri.

Per esempio, lo scorso anno negli Stati Uniti una banale esercitazione militare denominata Jade Helm 15 è diventata sul Web la prova di un imminente colpo di Stato ordito dall'Amministrazione del presidente Barack Obama. La notizia è stata creduta al pun-

to che il governatore del Texas Greg Abbott ha deciso nel dubbio di allertare la Guardia Nazionale.

Senza uscire dai confini italiani, abbiamo il caso della citazione erroneamente attribuita all'ex presidente della repubblica Sandro Pertini e più volte smentita dalla stessa Fondazione Pertini: «Quando il governo non fa ciò che il popolo vuole va cacciato con le mazze e con le pietre». Questa citazione è stata usata come simbolo evocativo per la «protesta dei forconi» ed è finita sui manifesti di una convocazione a una manifestazione nazionale contro il governo «corrotto» nel 2013.

Altro esempio interessante è il caso del senatore Cirenga, menzionato in un post ironico che a dicembre 2012 è diventato virale su Facebook. Cirenga avrebbe partorito una fantomatica proposta di legge per stanziare 134 miliardi di euro con cui aiutare i parlamentari a trovare un lavoro in caso di non rielezione. La notizia apparsa su Facebook era stata ideata come scherzo, tanto che nel testo che accompagnava l'immagine si leggeva: «È solo colpa del popolo caprone che l'ha votata ma che ha soprattutto condiviso questa immane boiata falsa che solo dei boccaloni come voi potevano reputare vera». L'unica traccia dell'esistenza del senatore Cirenga è una pagina Facebook classificata come «personaggio inventato». Non sono rari i messaggi di utenti indignati che ancora oggi lasciano sulla pagina del finto senatore commenti relativi alla fantomatica proposta (si veda l'immagine a fianco).

Vero o falso, non importa

Al laboratorio di computational social science dell'Istituto IMT Alti Studi Lucca studiamo le dinamiche del contagio sociale e la fruizione dei contenuti sui vari social network come Facebook, YouTube e Twitter. Il gruppo di ricerca è composto da due fisici (Guido Caldarelli e Antonio Scala), uno statistico (Alessandro Bessi), una matematica (Michela Del Vicario) e due informatici (Fabiana Zollo e l'autore di questo articolo). Nello specifico studiamo la viralità delle informazioni e come si formano e rinforzano le opinioni in un cyberspazio fortemente disintermediato dove i contenuti vengono immessi e fruiti senza alcun controllo.

In un primo lavoro, *Collective attention in the age of (mis)information*, pubblicato su «Computers in Human Behavior» nel 2015, ci siamo concentrati sulla fruizione di informazioni qualitativamente differenti: fonti di informazione ufficiali, fonti di informazione alternativa e quelle dei movimenti politici.

Le prime si riferiscono a tutti i quotidiani e agenzie che fanno informazione a copertura nazionale nel panorama italiano (indicate come *mainstream*). Le seconde riguardano invece le fonti di informazione che si autoproclamano promotrici di tutto quello che l'informazione manipolata nasconde agli utenti. L'ultima categoria riguarda movimenti e gruppi politici che fanno del Web uno strumento di mobilitazione politica.

Il lavoro di censimento, soprattutto delle fonti alternative, è stato lungo e certosino. Abbiamo raccolto e verificato manualmente varie indicazioni da utenti e da gruppi Facebook attivi nello smascherare le bufale (*Protesi di Complotto, Bufale un tanto al chilo, La menzogna diventa verità e passa alla Storia*).

Dalle 50 pagine Facebook censite abbiamo analizzato il comportamento *on line* di più di due milioni di utenti italiani che hanno interagito con le loro informazioni su una finestra temporale di sei mesi, da settembre 2012 a febbraio 2013.

I risultati hanno mostrato che informazioni qualitativamente diverse presentano caratteristiche molto simili in termini di durata, numero di utenti che vi interagiscono e persistenza degli uten-

L'esplosione dei social media

Ormai i social media sono parte integrante della nostra quotidianità, con un incessante aumento del numero di utenti. Secondo il rapporto *Digital, Social & Mobile in 2015* dell'agenzia We Are Social il numero di utenti attivi su Internet ha superato i 3 miliardi, arrivando al 42 per cento della popolazione mondiale. Riguardo ai social media, oggi gli utenti attivi sono più di 2 miliardi (29 per cento della popolazione mondiale). Nonostante il *digital divide*, grande piaga del nostro paese, l'Italia risulta molto attiva. Gli utenti attivi sono il 60 per cento della popolazione.

Se guardiamo il tempo trascorso on line si vede che in Italia l'accesso a Internet da desktop si attesta sui valori della media mondiale, mentre quello legato alla navigazione da dispositivi mobili è decisamente inferiore (2,2 ore al

giorno, contro una media di 2,7 ore). Gli italiani trascorrono 6,7 ore al giorno su Internet (tra dispositivi mobili e desktop), e 2,5 ore sono dedicate all'uso di canali social contro una media mondiale di 2,4 ore; per avere un termine di paragone, in Francia la media è di 2 ore, in Spagna di 1,9.

Il 60 per cento degli italiani accede regolarmente a Internet e gli account attivi sui canali social sono 28 milioni, di cui 22 milioni accedono da dispositivi mobili: quest'ultimo dato, ovvero l'accesso a canali social da mobile, è quello che ha visto il maggior incremento negli ultimi mesi. Possiamo affermare quindi che in Italia c'è una propensione sempre più grande a interagire in mobilità e in maniera attiva con i contenuti a cui è possibile accedere on line.

ti. Informazioni dai quotidiani nazionali, dalle fonti alternative e dedicate alla discussione politica riverberano allo stesso modo e non mostrano sostanziali differenze di fruizione sui social media. Per esempio, su tutte le categorie l'attenzione media che un post riceve è di 24 ore.

Complottisti manipolati

Tra le varie forme di espressione che troviamo su Facebook sono particolarmente interessanti i *troll*, all'inizio intesi come utenti a caccia della rissa sul Web, che tra commenti irriverenti e oppositivi cercano di creare scompiglio.

Ultimamente questa figura, stimolata dall'enorme eterogeneità di gruppi e interessi che invadono il Web, si è evoluta in qualcosa di più articolato. Dove c'è una dinamica sociale che calca troppo la mano e diventa estremista su un qualsiasi aspetto, compare la controparte troll che ne fa la parodia. Pagine che scimmiettano il comportamento dei sostenitori di movimenti politici nostrani (esilarante è *Siamo la Gente*, il *Potere ci temono*); pagine che pubblicano sempre la stessa foto di cantanti famosi in barba alla retorica della viralità dei contenuti, altre che postano foto di Ebola con i gattini, o altre ancora che fanno parodia dell'estremismo vegano.

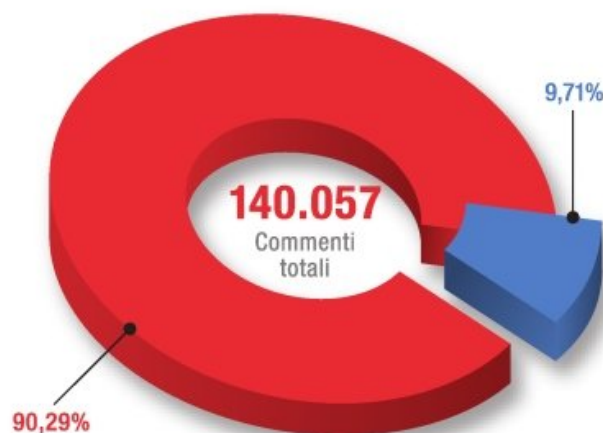
Tra i vari oggetti di scherno non mancano le teorie del complotto con post che parlano di abolire le leggi della termodinamica in Parlamento o che ritengono che da una recente analisi sulla composizione chimica delle scie chimiche emerga la presenza del sildenafil citrato, ovvero il principio attivo del Viagra.

Questi contenuti parodistici e caricaturali si sono rivelati fondamentali per i nostri studi, perché ci hanno permesso di misurare le abilità di *fact checking* degli internauti nostrani. Essendo concepiti a scopo parodistico, sono intenzionalmente falsi e veicolano contenuti paradossali; ci hanno permesso quindi di misurare fino a che punto il confirmation bias sia determinante nella scelta dei contenuti.

Più precisamente, per verificare potenziali attitudini derivanti dall'esposizione continua a tipi specifici di contenuto, sempre nello studio su «Computers in Human Behavior» abbiamo diviso gli utenti, categorizzandoli in base al tipo di informazione preferita tenendo conto della percentuale di *like* su un unico tipo di informazione, e ne abbiamo misurato le interazioni con uno specifico set, circa 5000, di informazioni troll.

Poco sorprendentemente abbiamo trovato che i *follower* di informazione alternativa, coloro cioè che sono particolarmente attenti all'informazione alternativa, sono i più pronti a mettere like e

ATTIVITÀ DI COMMENTO



Da utenti esposti a notizie scientifiche



Da utenti esposti a notizie alternative

■ Su notizie scientifiche ■ Su notizie alternative

Diversità. Gli utenti che parlano di notizie alternative sono più attivi (*sopra*) rispetto a quelli che discutono di scienza (*in alto*).



Bersaglio preferito. Una madre con il figlio chiede informazioni per la vaccinazione in una ASL di Milano. I vaccini sono uno dei bersagli preferiti della disinformazione, secondo cui sarebbero inutili o addirittura dannosi, affermazioni che non hanno alcun fondamento scientifico.

condividere informazioni troll, esattamente con la stessa modalità con cui consumano le altre.

Questo risultato è particolarmente interessante perché porta in evidenza quello che poi abbiamo chiamato «il paradosso del complottista»: quelli più attenti alla «manipolazione» perpetrata dai mezzi di comunicazione «manipolati» sono i più pronti a interagire con fonti di informazioni intenzionalmente false, e quindi potenzialmente anche i più pronti a essere manipolati.

Casse di risonanza

Il fatto che informazioni diverse siano consumate allo stesso modo pone sostanzialmente due ipotesi: che le informazioni siano trattate indistintamente da tutti gli utenti a prescindere dal tipo di contenuto; che esistano gruppi di interesse focalizzati su specifici contenuti e che il loro comportamento sia universale rispetto alla tipo di contenuto e narrativa scelti.

Quest'ultima è la più affascinante, perché ripropone il concetto di esposizione selettiva (confirmation bias) e l'idea che il Web, avendo facilitato l'interconnessione tra persone e l'accesso ai contenuti, abbia di fatto messo il turbo alla formazione delle *echo chamber*, comunità che condividono interessi comuni, selezionano informazioni, discutono e rinforzano le proprie credenze attorno a una narrazione del mondo condivisa.

Quindi un secondo passaggio è stato confrontare il comporta-

mento degli utenti esposti a fonti di informazione scientifica con quelli che seguono solitamente fonti di informazione alternativa e filo complottista. La scelta è peculiare: le fonti differiscono per avere o meno un mittente, un responsabile del messaggio. L'informazione scientifica fa riferimento a studi generalmente pubblicati da riviste scientifiche, di cui si conoscono autori, istituzioni e così via.

Nell'informazione complottista, invece, il frammento di informazione è formulato in modo da contenere l'incertezza che poi genera. Si tratta sempre di notizie riferite a qualche piano segreto e volutamente celato al grande pubblico.

Altra differenza sostanziale, a prescindere dalla veridicità dell'informazione riportata dalle due tipologie di fonti, è che sono narrative agli antipodi. La prima si basa su un paradigma razionale che (quasi sempre) cerca evidenze empiriche. La seconda – riprendendo la definizione di Cass Sunstein della Harvard University e autore di importanti libri sulle dinamiche sociali del complottismo, che a sua volta riprende il filosofo Karl Popper – si riferisce a un insieme di credenze che sono il risultato di un processo di causazione che porta ad attribuire gli eventi a un motore intenzionale. Il pensiero complottista ricalca l'incapacità di attribuire a conseguenze avverse un determinante casuale (forze di mercato, pressione evolutiva, complessità); sono caratteristiche che secondo Martin Bauer, psicologo sociale alla London School

Mondi paralleli e comunicanti nei social media

La mappa raffigurata in queste due pagine è, tecnicamente parlando, un grafo, cioè un insieme di elementi (detti nodi o vertici) uniti tra loro da collegamenti. Nelle scienze i grafi hanno una varietà di applicazioni: possono essere usati per rappresentare le relazioni tra più elementi, siano essi cellule, persone, istituzioni, pagine di un sito web, stazioni ferroviarie o componenti di una macchina. In questo grafo, che ho realizzato un po' per gioco e un po' per imparare a usare programmi per la visualizzazione dei dati e che è diventato virale su Internet a dicembre 2015, ho cercato di rappresentare l'immenso reticolo delle pagine di Facebook di carattere complottista. (L'indirizzo della pagina web diventata virale è <http://pvnmtt.it/pages/complottisti.html> e vi si può trovare anche una versione interattiva della mappa.)

Sono partito da un gruppo di 15 pagine la cui appartenenza al mondo del complottismo e della disinformazione è a mio parere difficilmente discutibile, come *Stop alle scie chimiche* o l'associazione COMILVA che si batte contro i vaccini. Con alcuni programmi ho estrapolato i nomi di tutte le pagine Facebook a cui queste pagine hanno messo «mi piace», o *like*, e ho ripetuto questa operazione con i risultati. Infine ho messo insieme i dati raccolti ottenendo questa complessa mappa che conta 2612 nodi (le pagine) e 22879 collegamenti.

Ogni cerchio, detto nodo, rappresenta una pagina su Facebook. Quando due nodi sono uniti tra loro significa che uno dei due ha messo «mi piace» all'altro. In questa versione del grafo non è indicato il verso della relazione, dunque non è possibile vedere quale delle due pagine ha messo «mi piace» o se la relazione è reciproca. Le pagine con gusti simili (in termini di pagine piaciute) si ritrovano tutte vicine. Al contrario, le pagine che hanno poco o niente in comune sono distanti tra loro. La dimensione dei nodi dipende dal numero di like ricevuti dalle altre pagine del grafo: più un nodo è grande, maggiori sono i like ricevuti e dunque la sua «autorevolezza» all'interno del reticolo. I colori delle pagine, infine, sono stati attribuiti automaticamente dal programma e ci permettono di distinguere i *cluster*, ovvero gruppi di pagine con interessi affini.

Nel grafo si può notare come le pagine di carattere propriamente complottista (Nuovo Ordine Mondiale, UFO e così via) si trovino quasi tutte al centro, nell'area fucsia. Spostandosi verso l'esterno il legame con le teorie del complotto tende a scomparire: è il caso di tante testate attendibili come «Repubblica» o il «Corriere della Sera» e di organizzazioni come Emergency che si trovano nella mappa solo perché hanno ricevuto like da altre pagine del reticolo.

Una delle osservazioni più interessanti che si evincono dal grafo, per me, è che non esiste una netta linea di demarcazione tra le pagine dedicate alle teorie del complotto, le pagine che pubblicano bufale e notizie false e tendenziose (concentrate nell'area di colore rosso) e l'informazione vera e propria. Tutto ciò riflette appieno la caratteristica di fondo dei cosiddetti complottisti: l'incapacità di distinguere tra fonti attendibili e fonti non attendibili.

Matteo Pavanati

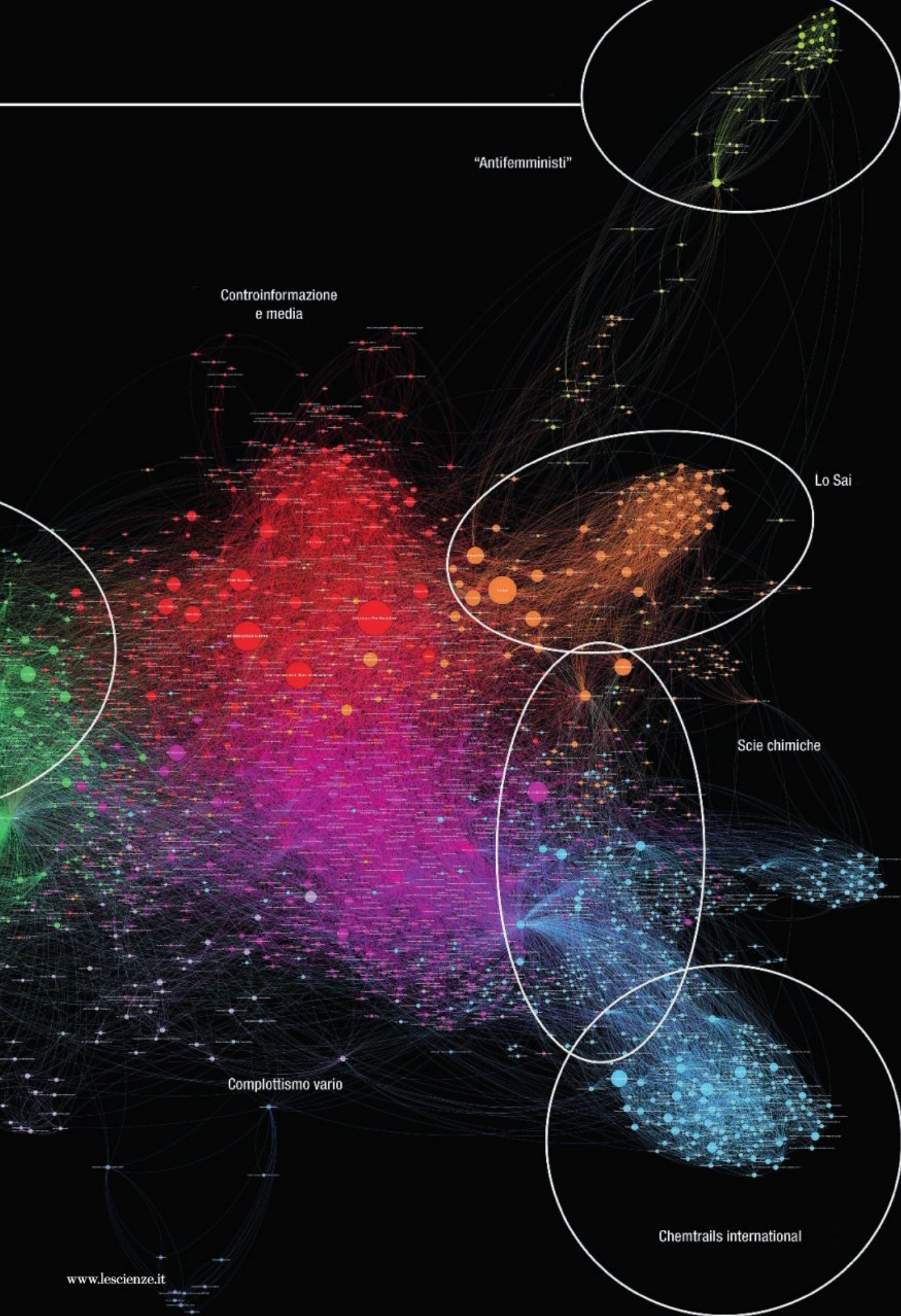


La dimensione dei nodi riflette il numero di «mi piace» ricevuti da altre pagine

Profondità: 1 livello

Pagine di partenza: Attivo.tv, Associazione COMILVA (antivaccini),

Contro la massoneria e gli illuminati, Coscienza sveglia, Cose che nessuno vi dirà, CSSC - cieli senza scie chimiche, Giuseppe Povia, Il dio alieno, lo odio i disinformatori, Killuminati soldiers, Koenig mb Koenig, Libera informazione, Movimento anti NWO, Neovitruvian, Rothschild la bestia che domina il mondo, Scie chimiche avvelenamento globale, Stop alle scie chimiche.



of Economics e studioso delle dinamiche complottiste, sono da attribuirsi a un modo «quasi religioso» di pensare i processi.

Un po' come quando all'alba dell'umanità si attribuiva una natura divina alle tempeste, ora succede lo stesso davanti ai processi intricati della globalizzazione e del processo tecnologico.

Interagendo con i vari gruppi on line attivi nel *debunking* di informazioni false, ovvero la smentita di queste informazioni false basata su conoscenze acquisite con il metodo scientifico, abbiamo definito l'insieme delle pagine Facebook da esplorare. Nel dettaglio, l'analisi fa riferimento a 73 pagine, di cui 39 complottiste e 34 scientifiche, per un totale di più di un milione di utenti italiani di Facebook in una finestra temporale di cinque anni, tra il 2010 e il 2014 per la precisione.

I risultati dello studio, *Science vs conspiracy: collective narratives in the age of misinformation* pubblicato su «PLOS ONE», hanno mostrato che nel Facebook nostrano il numero di utenti che segue fonti di informazione complottista è tre volte quello delle informazioni scientifiche e che entrambe sono assai focalizzate. Emerge chiaramente che gli utenti si aggregano intorno a narrative specifiche e raramente escono da quella echo chamber.

Informazioni verificate e non verificate vengono fruite allo stesso modo e in maniera mutualmente esclusiva. Questa caratteristica dell'interazione sociale su Facebook sembra avere un ruolo importante nella diffusione dei *rumor* falsi. Esaminando 4709 informazioni mirate a imitare satiricamente le teorie complottiste con tratti palesemente assurdi (Viagra nelle scie chimiche, per esempio) ne emerge che gli utenti più proni a interagire con questi contenuti (80 per cento) siano coloro che consumano principalmente informazioni filo-complottiste che non sono verificate.

Altra caratteristica interessante è che gli utenti focalizzati principalmente su informazioni complottiste tendono a diffondere di più, tramite la condivisione con i propri amici le informazioni complottiste.

A questo punto ci siamo chiesti se questa forte polarizzazione degli utenti che seguono fonti complottiste oppure scientifiche si riflettesse anche sulle amicizie virtuali. Quindi, esaminando più da vicino questa echo chamber abbiamo ricostruito la rete sociale dei due gruppi e abbiamo scoperto una regolarità statistica sorprendente: al crescere del numero di like su uno specifico tipo di narrativa aumenta linearmente la probabilità di avere una rete sociale virtuale composta solo da utenti con lo stesso profilo. Ovvero, più si è esposti a uno specifico tipo di narrazione, più aumenta la probabilità che tutti gli amici di Facebook abbiano la stessa attitudine al consumo di informazioni.

Le implicazioni di queste caratteristiche della rete sociale che si vede divisa in gruppi omogenei in base al tipo di contenuto fruito è fondamentale soprattutto per la comprensione della viralità dei fenomeni. Questi gruppi omogenei tenderanno a escludere tutto quello che non è coerente con la propria narrazione del mondo. Quindi è una struttura che facilita il rinforzo e facilita la selezione dei contenuti per confirmation bias.

Tribù separate

A partire da questa ultima osservazione la ricerca è proseguita esaminando gli effetti delle campagne di informazione che mirano a correggere la diffusione delle informazioni false nei social media. In uno studio pubblicato negli atti della conferenza «Social

Informatics» e intitolato *Social determinants in the age of misinformation* abbiamo confrontato tra gli utenti generalmente esposti a fonti di informazione complottista, quelli che sono stati esposti a post di debunking e quelli che invece non lo sono stati. Nello specifico abbiamo misurato la persistenza, cioè la probabilità di continuare a mettere like su uno specifico tipo di contenuto nel tempo, per gli utenti esposti e per quelli non esposti a campagne di informazione mirate a smentire informazioni false. I risultati hanno mostrato che per gli utenti esposti a debunking la probabilità di continuare a interagire con informazioni complottiste è circa il 30 per cento più elevata rispetto ai non esposti.

In parole povere, cercare di convincere un sostenitore delle scie chimiche che queste non esistono produce un effetto di rinforzo della sua credenza che si manifesta in una maggiore interazione con le fonti di informazione erranee.

Abbiamo verificato le stesse dinamiche nel contesto del Facebook statunitense su 55 milioni di utenti e abbiamo trovato sostanzialmente le stesse dinamiche. Gli utenti sono polarizzati, si informano e formano la propria opinione secondo un processo cognitivo che evita il conflitto a favore delle informazioni a sostegno della propria credenza. Il principale motore per la diffusione

dei contenuti sembra proprio l'omofilia. Gli utenti condividono principalmente i contenuti da altri utenti con un profilo simile.

Quest'ultimo risultato, pubblicato a gennaio 2016 sui «Proceedings of the National Academy of Sciences» con il titolo *The spreading of misinformation on line*, è molto interessante perché ci ha permesso di sviluppare modelli predittivi, basati sulla meccanica dei fluidi percolativi, che ci permettono con buona approssimazione di calcolare la dimensione dei fenomeni virali.

Con un altro lavoro, *Emotional dynamics in the age of misinformation* pubblicato a settembre 2015 su «PLOS ONE», sempre esaminando

l'insieme dei dati degli studi precedenti con le fonti di informazione complottista e scientifica, attraverso tecniche di *sentiment analysis*, ovvero algoritmi che con un dovuto allenamento sono in grado di fornire con buona approssimazione il sentimento espresso dagli utenti nei commenti ai post, troviamo che più lunga è la discussione più si va verso un sentimento negativo.

Questo vale sia per chi fruisce fonti di informazione complottista sia informazione scientifica, anche se i complottisti sembrano tendenzialmente più negativi. In ogni caso, una discussione prolungata su un post sembra produrre una degenerazione negativa. In pratica è come se gli utenti coinvolti si influenzassero negativamente, tendendo a esprimere sentimenti negativi al crescere della discussione.

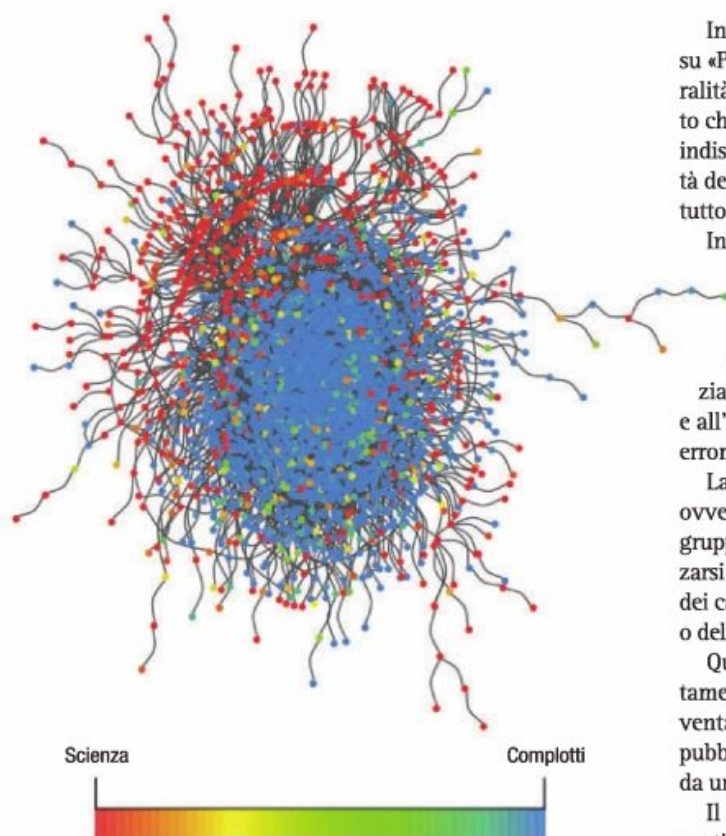
Dentro la cassa

Finora ci siamo focalizzati sul comportamento della echo chamber guardandola dall'esterno, e abbiamo trovato che i contenuti sono selezionati per confirmation bias e che altre informazioni sono ignorate o trattate in maniera antagonista.

Le comunità che si aggregano attorno ad argomenti specifici di cui condividono la narrazione (come i complottisti) tendono a confrontarsi al loro interno per stabilire i principi di causazione e trovando spiegazioni a fenomeni ritenuti interessanti.

In generale, diversi studi sulle dinamiche del pensiero complottista suggeriscono che questa narrazione è variegata e spesso ha

**Cercare
di far ragionare
un sostenitore
di una qualsiasi
teoria di
complotto
è inutile, si
ottiene l'effetto
contrario**



Polarizzazione. Prendendo gli utenti che seguono generalmente fonti scientifiche oppure complottiste gli autori hanno ricostruito la loro rete di amicizie, ottenendo un'immagine chiara delle *echo chamber*: in rosso gli utenti generalmente esposti a fonti di informazione scientifica e in blu gli utenti esposti a fonti di informazione complottista.

l'obiettivo di identificare la paura di quello che non si conosce o più in generale di convogliare sentimenti di ansia e paranoia su oggetti e storie specifiche.

Una società aperta e globalizzata tende discutere e cerca spiegazioni ai fenomeni che la riguardano come per esempio la multiculturalità, la maggiore complessità del circuito finanziario su scala globale, il progresso tecnologico. Purtroppo, però, la complessità dei fenomeni a volte fa preferire all'utente, a prescindere dal livello di istruzione, una spiegazione più compatta, che identifichi chiaramente un oggetto da colpevolizzare, per esempio il riscaldamento globale indotto dalle scie chimiche o i disagi della globalizzazione indotti dai piani segreti dei rettiliani.

Mettendo il focus all'interno della *echo chamber* complottista nostrana troviamo che gli utenti tendono ad abbracciare le tesi più variegata al crescere della loro attività on line.

Attraverso algoritmi di *automatic topic extraction*, ovvero tecniche informatiche che servono a raggruppare i contenuti on line in base ai temi trattati analizzandone il testo, applicati al corpus del Facebook italiano sul versante complottista, troviamo che i *topic* appartengono fondamentalmente a quattro classi specifiche: dieta, ambiente, salute e geopolitica. Questo risultato è abbastanza in linea con altri paesi; nello specifico abbiamo visto che gli stessi argomenti sono presenti anche negli Stati Uniti, anche se in quel caso c'è anche una forte attenzione a UFO e alieni.

In *Trend of Narrative in the Age of Misinformation*, pubblicato su «PLoS ONE», abbiamo mostrato che la fruizione, nonché la viralità, dei post legati a questi temi è fortemente correlata al punto che al crescere dell'attività dell'utente si tenderà ad abbracciare indistintamente tutto il *corpus*. Infatti, quanto maggiore è l'attività dell'utente, tanto maggiore sarà la sua tendenza ad abbracciare tutto il corpus complottista a prescindere dal topic specifico.

In breve, una volta dentro l'*echo chamber* si tenderà ad assorbire tutti i contenuti proposti.

Fine dell'era dell'informazione?

Le dinamiche sociali che emergono dai nostri studi evidenziano in modo chiaro le problematicità relative alla formazione e all'emergenza di narrazioni su fatti e fenomeni potenzialmente erronei nei social media.

La selezione dei contenuti avviene per pregiudizio di conferma, ovvero per *confirmation bias*, e questo porta alla formazione di gruppi solidali su specifici temi e narrazioni che tendono a rinforzarsi e allo stesso tempo ignorare tutto il resto. Nella maggior parte dei casi la discussione degenera in un litigio tra estremisti dell'una o dell'altra visione, e si fomenta quindi la polarizzazione.

Questo contesto rende di fatto molto difficile informare correttamente e, come conseguenza, fermare una notizia infondata diventa di fatto impossibile. La bufala del senatore Cirenga è stata pubblicata in un moto di indignazione su Twitter qualche mese fa da un noto attore.

Il problema della disinformazione sui social media è molto sentito, al punto che Facebook ha introdotto la possibilità per gli utenti di segnalare informazioni false, mentre Google sta studiando un metodo per considerare l'affidabilità delle pagine nella classifica dei risultati da mostrare all'utente.

In ogni caso, a valle dei nostri studi emergono forti dubbi sulla efficacia di soluzioni algoritmiche e ingegneristiche che i grandi colossi del Web stanno applicando.

Probabilmente per molto tempo ancora le nostre cene saranno allietate da infuocate discussioni sull'ultimo megacomplotto mondiale ordito dai rettiliani o da interessanti disquisizioni sui potenti effetti della nuova dieta a base di acqua, ghiaia e capesante che spopola sul Web. L'importante è diffondere quello che ci viene tenuto nascosto, poi che sia vero o falso poco importa. Che sia il caso di cambiare la dicitura di era dell'informazione in era della credulità? ■

PER APPROFONDIRE

Global Risks Report 2013. World Economic Forum, 2013. <http://reports.weforum.org/global-risks-2013>.

Collective attention in the age of (mis)information. Mocanu D., Quattrocchi W. e altri, in «Computers in Human Behavior», Vol. 51, parte B, pp. 1198-1204, ottobre 2015.

Science vs conspiracy: collective narratives in the age of misinformation. Bessi A., Quattrocchi W. e altri, in «PLoS ONE», Vol. 10, n. 2, e0118093, 23 febbraio 2015.

Social determinants of content selection in the age of (mis) information. Bessi A., Quattrocchi W. e altri, in «Social Informatics», pp. 259-268, Springer 2014.

Emotional dynamics in the age of misinformation. Zollo F., Quattrocchi W. e altri, in «PLoS ONE», Vol. 10, n. 9, e0138740, 30 settembre 2015.

The spreading of misinformation online. Del Vicario M., Quattrocchi W. e altri, in «Proceedings of the National Academy of Sciences», Early Edition, 4 gennaio 2016. **Doi: 10.1073/pnas.1517441113.**

Trend of narratives in the age of misinformation. Bessi A., Quattrocchi W. e altri, in «PLoS ONE», Vol. 10, n. 8, e0134641, 14 agosto 2015.

Che cosa uccise i dinosauri?

L'impatto con l'asteroide fu terribile.
Ma avvenne anche
nel peggior momento possibile

di Stephen Brusatte

IN BREVE

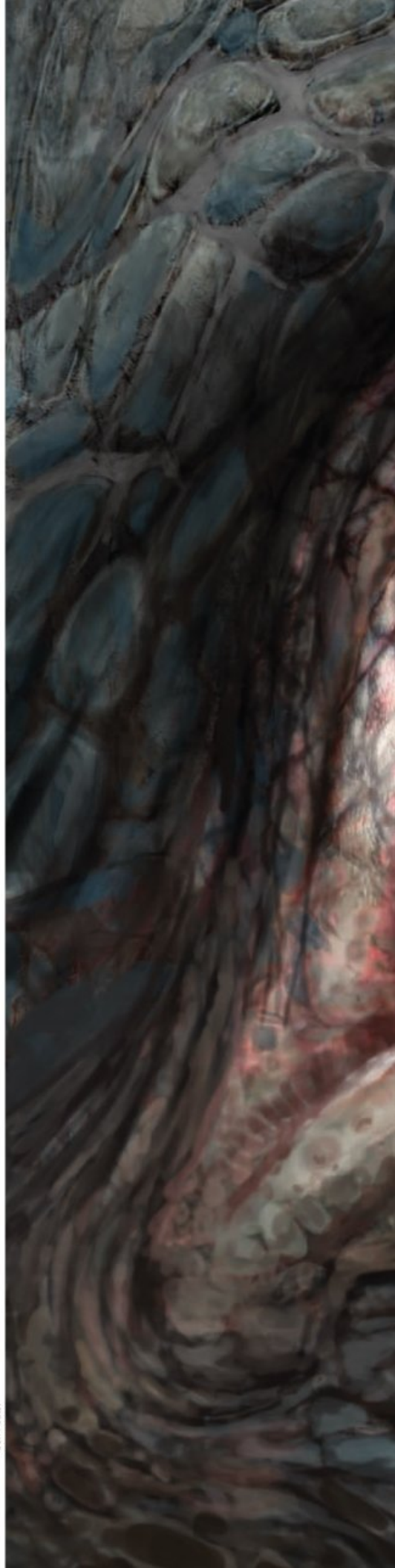
L'estinzione dei dinosauri è uno dei più grandi misteri della scienza.

Una teoria popolare proposta qualche decina di anni fa ritiene che la scomparsa sia stata causata dall'impatto di un asteroide.

Ma alcuni scienziati si sono chiesti se altri fattori possano aver contribuito all'estinzione.

Una nuova analisi indica che la gigantesca roccia spaziale ha colpito la Terra quando le comunità di dinosauri erano già vulnerabili.

Jon Foster







La chiesa del Salvatore sul Sangue Versato, a San Pietroburgo, sembra uscita dalle favole. Arroccata sulla riva di un gelido canale, la sua foresta di cupole a cipolla attraversa il cielo mentre, all'interno, ogni centimetro quadrato è ricoperto di mosaici policromi. Non è il tipo di posto dove in genere un paleontologo va a farsi un giretto, ma ero in città per studiare un nuovo dinosauro e ho sentito il bisogno di distrarmi. Era una curiosità personale.

La chiesa fu costruita sul luogo dove i rivoluzionari russi uccisero lo zar Alessandro II nel 1881, inaugurando una catena di eventi che hanno portato fino a me.

La morte dello zar diede origine a una terribile successione di stragi antisemite. Nella popolazione ebraica dell'impero russo cresceva la paura, e una famiglia lituana, presa dal panico, cercò di salvare il figlio mandandolo in America. Quel ragazzo era il mio trisnonno. Se non fosse per la concatenazione di eventi iniziata a San Pietroburgo oltre un secolo fa, oggi non sarei qui.

Ogni famiglia ha storie come questa, strane giravolte del destino che affondano le radici nel passato più lontano, senza il quale il presente sarebbe diverso. L'evoluzione funziona allo stesso modo. La storia della vita è un grande racconto di eventi contingenti che può essere deviato a ogni istante. In effetti è proprio quello che è avvenuto 66 milioni di anni fa, nel Cretaceo superiore. Prima i dinosauri avevano dominato il pianeta per 150 milioni di anni, raggiungendo dimensioni spaventose e riproducendosi in tutti i possibili ambienti terrestri. Ma a un certo punto qualcosa è cambiato, e *Tyrannosaurus* e *Triceratops* sono scomparsi, con tutti i loro simili, dalla faccia della Terra.

L'estinzione dei dinosauri è uno dei più grandi misteri di tutta la scienza, che fin da adolescente ha fatto nascere la mia passione per la paleontologia. Negli ultimi dieci anni, mentre raccoglievo fossili di dinosauro in giro per il mondo, continuavo a girarmi in testa una domanda: com'è possibile che creature così di successo siano semplicemente scomparse nel nulla? Un'ipotesi avanzata negli anni ottanta attribuisce la causa a un meteorite. Gli scettici si sono però domandati se altre forze possano aver contribuito alla loro fine. Con la scoperta di nuovi dinosauri e con una conoscenza più approfondita dell'evoluzione di questo gruppo, ci stiamo avvicinando a una risposta.

Di recente ho organizzato un incontro internazionale di paleontologi per discutere di quello che sappiamo sul perché i dinosauri si sono estinti. Abbiamo usato il più aggiornato inventario sulla diversità dei dinosauri per esaminare gli andamenti evolutivi nel tempo, abbiamo riesaminato le ultime informazioni sulla tempistica dell'estinzione e analizzato a fondo i numerosi cambiamenti ambientali verificatisi nel periodo della loro scomparsa. Con grande sorpresa di tutti, il gruppo composto da una decina di esperti spesso in polemica tra loro è giunto a una conclusione unanime: è vero, come si dice, che l'estinzione è stata improvvisa e che il responsabile è soprattutto un asteroide, ma è una spiegazione insuf-

ficiente. L'impatto è avvenuto in un momento in cui i dinosauri erano già indeboliti, e i loro ecosistemi vulnerabili per via di cambiamenti ambientali precedenti. È un colpo di scena inaspettato in una vecchia storia, che ha importanti conseguenze per il mondo moderno e la nostra storia evolutiva.

Un mistero ancora irrisolto

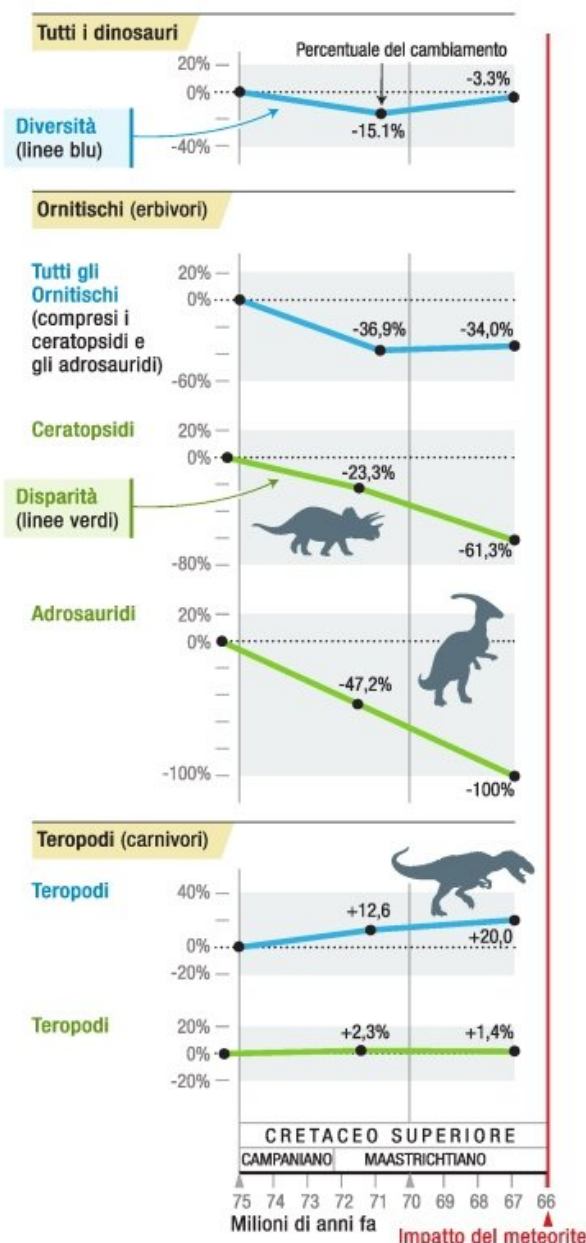
Come tanti, anch'io da adolescente ho commesso qualche avventatezza. Non c'era niente di più sfrontato che alzare il telefono, in quel giorno di primavera del 1999, e chiamare il geologo Walter Alvarez, dell'Università della California a Berkeley. Io ero un quindicenne ossessionato dai dinosauri, lui l'eminente membro della National Academy of Sciences che una ventina d'anni prima aveva ipotizzato che a sterminare i dinosauri fosse stato il terribile impatto con un asteroide.

Alvarez era partito da un'osservazione curiosa. Le testimonianze geologiche conservano una sottile banda di argilla che segna il confine fra i sedimenti del Cretaceo superiore dominato dalla presenza di dinosauri, dai 145 ai 66 milioni di anni fa, e quelli del Paleogene, fra i 66 e i 23 milioni di anni fa, che non riporta tracce di dinosauri. Alvarez aveva trovato che la banda di argilla era saturata di iridio, un elemento raro sulla Terra ma abbondante in corpi extraterrestri come comete e asteroidi. Lo scienziato aveva notato per la prima volta l'anomalia in Italia, in una gola rocciosa nei pressi di Gubbio. Nel 1999 la mia famiglia aveva deciso di fare un viaggio in Italia per festeggiare il ventesimo anniversario di matrimonio dei miei genitori. Avevo tormentato mio padre e mia madre fino a quando non li avevo convinti a interrompere le visite di basiliche e musei per fare tappa a Gubbio e vedere le caratteristiche geologiche che testimoniavano il celebre scenario dell'asteroide killer elaborato da Alvarez. Ma avevo bisogno di indicazioni, quindi avevo deciso di rivolgermi direttamente alla fonte.

Il fatto che Alvarez non solo mi avesse risposto, ma anche fornito dettagliate informazioni sul punto esatto dove aveva rilevato l'eccesso di iridio nella Gola, ancora mi sbalordisce. Non mi aspettavo che un simile gigante della scienza potesse essere così gentile e generoso con il suo tempo. La teoria dell'asteroide pubblicata nel 1980 su «Science» a firma sua, del padre Luis, fisico già vincitore del premio Nobel, e di due colleghi di Berkeley inaugurò un decennio di accesi dibattiti sui dinosauri e la loro estinzione. L'idea dell'impatto occupò le pagine dei giornali, fu affrontata da libri e documentari; e centinaia di articoli scientifici discutevano su

Erbivori in difficoltà

Analisi dei fossili del Nord America mostrano nel complesso una buona condizione per i dinosauri in termini di numero complessivo di specie (una misura nota come diversità) al momento dell'impatto dell'asteroide 66 milioni di anni fa (*in alto*). Ma uno sguardo più da vicino rivela anche declino. Uno dei gruppi principali, i teropodi, se la passava bene (*in basso*), ma un altro fondamentale gruppo, gli ornitiscidi, si stava indebolendo in diversità e disparità, una misurazione di quanto le specie varino in termini di anatomia e dimensioni (*nel mezzo*). Due sottogruppi di ornitiscidi, dinosauri con corna e a becco d'anatra, erano in particolare difficoltà. Quasi sicuramente il loro declino ha avuto conseguenze per gli altri dinosauri.



Fonte: The extinction of the dinosaurs, di Stephen L. Brusatte e altri, in «Biological Reviews», Vol. 90, n. 2, maggio 2015

che cosa realmente uccise i dinosauri, con paleontologi, geologi, chimici, ecologi e astronomi che dicevano la propria sul più scottante argomento scientifico del momento.

Alla fine degli anni ottanta era ormai innegabile che un asteroide o una cometa avesse colpito la Terra 66 milioni di anni fa. Lo stesso strato di iridio era stato trovato in altre regioni, insieme ad altre stranezze geologiche collegate a impatti con corpi extraterrestri: piccole sfere di silicio vetrificato chiamate tectiti e granuli di quarzo deformati noti come *shocked quartz*. In Messico inoltre era stato individuato un cratere che risaliva all'epoca dell'estinzione, il cratere di Chicxulub, largo 180 chilometri. Qualcosa di immenso e inatteso, di dieci chilometri di diametro, era arrivato dallo spazio scatenando un cataclisma di eruzioni vulcaniche, incendi, maremoti, piogge acide e nubi di polvere e detriti che hanno oscurato il Sole condannando a morte i dinosauri.

Eppure gli scienziati avevano poche informazioni su come i dinosauri fossero cambiati durante il periodo antecedente all'impatto e su come dinosauri ed ecosistemi avessero reagito a questo eccezionale disastro ambientale. Il dibattito quindi infuriava tra due posizioni: l'asteroide aveva ucciso all'improvviso i dinosauri mentre erano ancora nel loro periodo più fiorente oppure era stato il colpo di grazia inferto a un gruppo moribondo che si stava lentamente spegnendo e si sarebbe comunque estinto. Dopotutto l'asteroide non colpì un pianeta statico, ma un pianeta che sperimentava ampie fluttuazioni del livello dei mari, profonde variazioni climatiche e un vulcanismo estremo. Forse alcuni di questi fattori hanno influito sull'estinzione dei dinosauri?

Ultime scoperte

Durante quel viaggio in Italia con la mia famiglia non sono mai arrivato a Gubbio. Un'alluvione aveva bloccato la linea ferroviaria da Roma, ed ero rimasto assai deluso. Il destino può essere molto crudele a volte (chiedetelo ai dinosauri), ma poi la fortuna gira. Immaginate dunque la mia immensa sorpresa quando, cinque anni più tardi, sono tornato in Italia per partecipare a un campo geologico presso Coldigioco, un piccolo osservatorio sugli Appennini diretto da Alessandro Montanari, fra i più importanti scienziati che negli anni ottanta erano diventati noti grazie ai loro studi sull'estinzione di massa del Cretaceo. Durante la visita del primo giorno passai nella biblioteca dell'osservatorio dove, sotto una luce tremolante, una figura solitaria analizzava una mappa geologica. «Vi presento il mio amico e maestro Walter Alvarez», aveva annunciato Montanari con il suo musicale accento italiano. «Qualcuno di voi ne avrà sentito parlare».

Alcuni giorni dopo eravamo nella Gola del Bottaccione, a Gubbio, sotto il caldo sole mediterraneo e le automobili che ci sfrecciavano intorno. In piedi davanti agli studenti universitari, Alvarez indicava il punto esatto dove era stata concepita la teoria dell'asteroide. I miei compagni mi prendevano in giro perché non smettevo più di sorridere dopo che, presentatomi ad Alvarez, lui si era ricordato della nostra conversazione di cinque anni prima. Quella giornata è impressa nella mia memoria come uno dei momenti che più hanno segnato gli inizi della mia carriera. Avevo capito che il mistero dell'estinzione dei dinosauri mi aveva conquistato.

Paradossalmente, poi, nei miei studi mi sono concentrato più su ascesa e dominio dei dinosauri, oltre che su origine e prima evoluzione degli uccelli (emersi dai dinosauri e, quindi, l'unico gruppo di dinosauri che non si è mai estinto). Ma alla fine ho avuto l'occasione per contribuire al dibattito sull'estinzione dei dinosauri nel 2012, quando stavo per finire il dottorato. Il mio collega

L'indebolimento della rete alimentare

I modelli al computer della rete alimentare dei dinosauri del Nord Americani vissuti nel Cretaceo superiore a Careless Creek Quarry, in Montana, e della rete più giovane per Lull 2 Quarry, in Wyoming, suggeriscono che le perdite subite dai dinosauri dotati di corna e da quelli a becco d'anatra abbiano influito enormemente su altre specie di dinosauri.

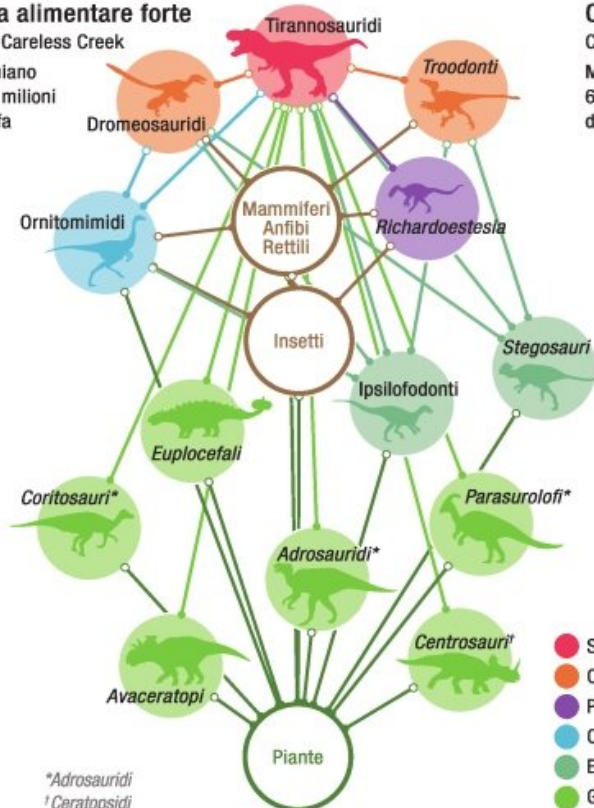
Questi erbivori di dimensioni gigantesche erano specie fondamentali per la catena alimentare, perché erano prede di dinosauri carnivori. La scomparsa di questi giganti erbivori ha destabilizzato le reti alimentari, rendendo i dinosauri ancora più esposti ai devastanti effetti dell'impatto con l'asteroide con la Terra.

Catena alimentare forte

Cava di Careless Creek

Campaniano

77 - 74 milioni di anni fa



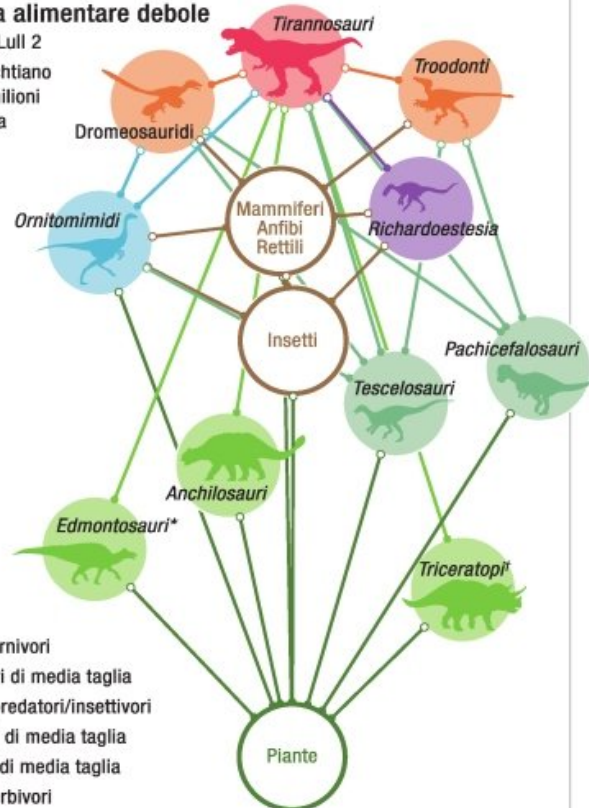
*Adrosauridi
† Ceratopsidi

Catena alimentare debole

Cava di Lull 2

Maastrichtiano

68-65 milioni di anni fa



● Supercarnivori
● Carnivori di media taglia
● Piccoli predatori/insettivori
● Onnivori di media taglia
● Erbivori di media taglia
● Grandi erbivori

dell'Università di Birmingham Richard Butler, che usa la statistica per studiare tendenze evolutive, aveva avuto un'idea astuta. Perché non mettere insieme le nostre competenze sui diversi gruppi di dinosauri e sulle differenti tecniche di analisi per ottenere un nuovo sguardo su come erano cambiati i dinosauri tra i 10 e i 15 milioni di anni prima della loro estinzione?

Quindi abbiamo deciso di esaminare gli andamenti della diversità dei dinosauri usando una metrica chiamata «disparità morfologica». La disparità è essenzialmente una misurazione anatomica della biodiversità: quantifica la variabilità di dimensioni, forma e anatomia del corpo in un gruppo nel tempo attraverso ecosistemi. Immaginate due ecosistemi, uno con 15 specie di piccoli roditori e l'altro con un pipistrello, una gazzella e un elefante. Il primo ecosistema potrebbe avere più specie, ma il secondo ha un insieme di specie con diversità assai più grande riguardo a dimensioni, forma e comportamento. Spesso la disparità può fornire un quadro più completo della vitalità e della biodiversità dei gruppi rispetto a quello che può fare una semplice conta delle specie, e noi volevamo vedere se nei dinosauri c'era qualche tendenza evidente. Una disparità crescente o stabile durante l'ultimo periodo del Cretaceo avrebbe indicato che i dinosauri erano in buone condizioni al mo-

mento dell'impatto con l'asteroide, mentre una disparità in diminuzione avrebbe suggerito che invece avevano problemi a prescindere dalla caduta dell'oggetto extraterrestre.

Abbiamo trovato risultati affascinanti. Fra i 10 e i 15 milioni di anni prima dell'impatto la maggior parte dei dinosauri aveva una disparità stabile, con carnivori teropodi (come *Tyrannosaurus* e *Velociraptor*), sauropodi dal collo lungo ed erbivori di media e piccola taglia (tipo il pachicefalosauro con il cranio a cupola). Due sottogruppi però erano in pieno declino della disparità quando è arrivato l'asteroide: i dinosauri muniti di corna (*Triceratops* e simili) e i dinosauri a becco d'anatra. Entrambi i gruppi erano erbivori di grandi dimensioni che mangiavano enormi quantità di vegetazione. Se foste vissuti 66 milioni di anni fa, vi sareste subito accorti che questi dinosauri erano i più abbondanti. Erano le vacche del Cretaceo, gli erbivori chiave della rete alimentare.

Nel periodo in cui abbiamo pubblicato i nostri risultati, altri ricercatori hanno esaminato l'estinzione dei dinosauri da angolazioni diverse. I gruppi guidati da Paul Upchurch dello University College e da Paul Barrett del Natural History Museum di Londra hanno censito la diversità delle specie nel tempo, scoprendo che nel complesso i dinosauri erano ancora molto diversificati al mo-

mento dell'impatto con l'asteroide, ma che il gruppo che comprendeva i dinosauri dotati di corna e i dinosauri ornitorinco soffriva di una diminuzione del numero di specie. Le loro scoperte erano in accordo con i nostri calcoli sulla disparità.

Ma come avrebbe potuto una riduzione di ricchezza delle specie e di disparità nei grandi erbivori influire sul resto del gruppo? Alcuni indizi sono stati ottenuti da uno studio innovativo effettuato da Jonathan Mitchell, all'epoca studente di PhD all'Università di Chicago. Mitchell e colleghi hanno costruito un modello virtuale di reti alimentari dei dinosauri in vari ecosistemi del Cretaceo e hanno simulato che cosa sarebbe accaduto con un piccolo numero di specie messe fuori gioco. Il risultato è stato clamoroso: le reti alimentari attive al momento dell'impatto dell'asteroide, che comprendevano meno grandi erbivori a causa del declino della diversità, sono collassate più facilmente rispetto alla reti più diversificate risalenti a qualche milione di anni prima dell'impatto.

Il momento peggiore

Visti i tanti nuovi dati sull'estinzione dei dinosauri pubblicati su riviste scientifiche, con Butler abbiamo avuto un'idea pericolosa: riunire un gruppo di esperti disposti a discutere tutte le conoscenze disponibili sull'argomento e a cercare una conclusione unanime sulle cause dell'estinzione dei dinosauri. All'inizio è stato più che altro un divertimento, d'altronde i paleontologi discutevano da anni: chi eravamo noi per pensare di risolvere la questione? Il nostro piccolo piano sovversivo poteva finire in un vicolo cieco o, ancora peggio, in una grande rissa. In realtà è successo il contrario. Il gruppo di 11 scienziati, provenienti da Stati Uniti, Canada e Regno Unito, ha raggiunto un accordo e abbiamo pubblicato il nostro studio a maggio 2015 su «Biological Reviews».

Ecco quello che abbiamo trovato quando abbiamo esaminato di nuovo tutte le prove: nell'ultimo periodo del Cretaceo i dinosauri sembravano passarsela abbastanza bene. Non ci sono segni che la loro diversità complessiva (in termini di numero di specie e di disparità) sia diminuita gradualmente in milioni di anni. I gruppi più importanti sono scomparsi nelle ultimissime fasi del Cretaceo, e almeno in Nord America, dove il registro fossile dei dinosauri dell'ultima parte del Cretaceo è il più completo di tutti, sappiamo che *Tyrannosaurus*, *Triceratops* e i loro clan sono stati testimoni dell'impatto dell'asteroide. Queste scoperte hanno escluso l'ipotesi di un tempo popolare di una graduale declino dei dinosauri, presumibilmente per fluttuazioni a lungo termine del livello del mare e della temperatura che avevano modificato la quantità dei terre emerse e il tipo di cibo accessibili a questi animali. Al contrario, in termini geologici l'estinzione di massa è stata improvvisa. Era quindi ragionevole che il responsabile fosse l'impatto, un evento improvviso e inatteso.

Ma, come avevamo sospettato in base ai nostri primi studi, l'asteroide non raccontava tutto. Proprio alla fine del Cretaceo i grandi erbivori erano entrati in una fase di declino. L'origine di questo fenomeno è incerta, ma potrebbe avere a che fare con un calo a breve termine del livello del mare che ha cambiato enormemente la superficie di territorio disponibile per i dinosauri nei loro ultimi milioni di anni, almeno in Nord America, che conserva di gran lunga la migliore testimonianza fossile di quel periodo. In qualità di erbivori più abbondanti, i dinosauri dotati di corna e quelli a becco d'anatra sarebbero stati i primi a sentire gli effetti

del cambiamento riguardante l'estensione del proprio territorio e la vegetazione. A quanto pare il loro declino non è stato privo di conseguenze: ha reso gli ecosistemi più vulnerabili al collasso, destabilizzando le fondamenta della rete alimentare, incrementando la probabilità che l'estinzione di solo poche specie si ripercuotesse a cascata attraverso l'ecosistema.

In conclusione, sembra che l'impatto con l'asteroide sia avvenuto in un momento tremendo per i dinosauri. Se fosse successo pochi milioni di anni prima, anticipando la diminuzione della diversità dei grandi erbivori, gli ecosistemi dei dinosauri sarebbero stati più robusti e più capaci di resistere all'impatto. Invece qualche milione di anni dopo forse la diversità degli erbivori sarebbe stata in ripresa, come lo era stata innumerevoli volte nei precedenti 150 milioni di anni di evoluzione dei dinosauri. Per un asteroide di 10 chilometri di diametro non è mai il momento giusto per cadere dal cielo, ma per i dinosauri 66 milioni di anni fa era forse il momento di gran lunga peggiore. Con solo un piccolo spostamento nella cronologia, potrebbero essere ancora qui.

Quello che è avvenuto 66 milioni di anni fa, quando quel grande blocco di roccia e ghiaccio si è schiantato in Messico nel momento meno opportuno per i dinosauri, riecheggia ancora oggi. Le estinzioni di massa sono tragiche, ma allo stesso tempo liberano spazio per nuove piante e animali che possono evolversi e diventare dominanti. La morte dei dinosauri ha dato un'opportunità

ai mammiferi, che erano vissuti nell'ombra per oltre 100 milioni di anni ma ora avevano la possibilità di evolvere senza impedimenti. I mammiferi sono prosperati quasi immediatamente dopo l'estinzione dei dinosauri, crescendo di dimensioni e sviluppando nuove diete e comportamenti, diffondendosi in tutto il mondo. Quella prosperità alla fine ha portato all'affermazione dei primati, che a sua volta ha portato a noi. Eliminate un qualsiasi collegamento di questa reazione a catena storica, e probabilmente cancellerete gli esseri umani.

Ma c'è una lezione ancora più grande nell'estinzione dei dinosauri. Non è solo una storia di contingenza evolutiva che impegna il cervello, un

altro evento del lontano passato che ci fa giocare con i «se» e i «ma». Più semplicemente, quello che è avvenuto alla fine del Cretaceo ci dice che il gruppo di organismi dominanti può estinguersi, e anche all'improvviso. I dinosauri hanno dettato le regole per oltre 150 milioni di anni, quando è arrivato il loro momento fatale: una collisione di un secondo tra Terra e spazio. E la loro estinzione è stata facilitata, se non addirittura resa possibile, dalla perdita di diversità biologica che ha preceduto l'impatto. Noi esseri umani siamo sulla Terra da poche centinaia di migliaia di anni, e già stiamo trasformando l'ambiente a una rapidità tale che sta verificandosi la cosiddetta «sesta estinzione», con un rapido declino della biodiversità globale. Nel frattempo, quanto ci stiamo rendendo vulnerabili?

PER APPROFONDIRE

T. Rex e il cratere dell'apocalisse. Alvarez W., Mondadori, Milano, 1998.

The Extinction of the Dinosaurs in North America. Fastovsky E. e Sheehan P.M., in «GSA Today», Vol. 15, n. 3, pp. 4-10, marzo 2005.

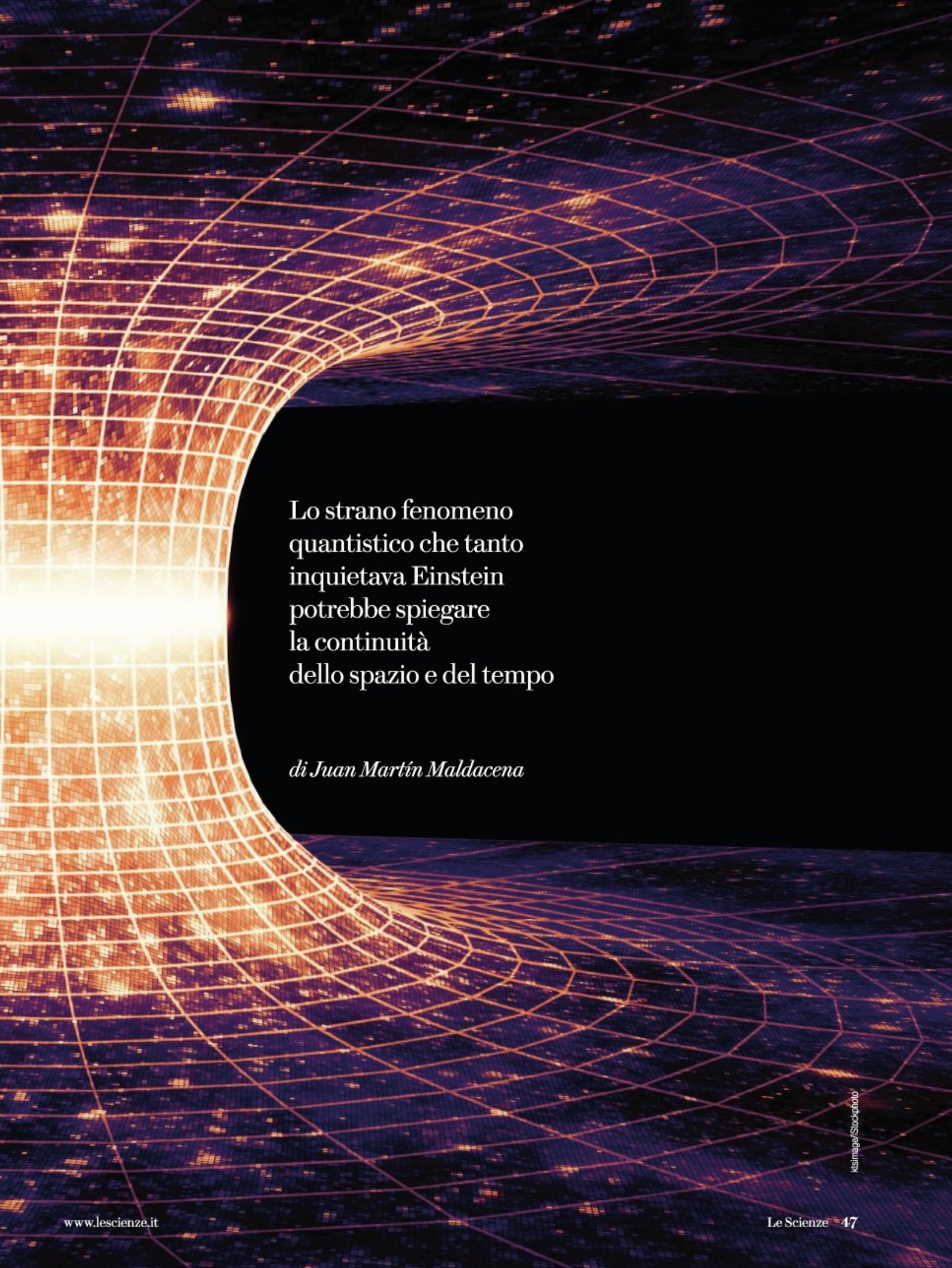
The Extinction of the Dinosaurs. Brusatte L. e altri, in «Biological Reviews», Vol. 90, n. 2, pp. 628-642, maggio 2015.

Che cosa causò l'estinzione in massa? Un impatto extraterrestre - Un'eruzione vulcanica. Alvarez W., in «Le Scienze» n. 268, dicembre 1990.



FISICA TEORICA

Entanglement quantistico e geometria



Lo strano fenomeno
quantistico che tanto
inquietava Einstein
potrebbe spiegare
la continuità
dello spazio e del tempo

di Juan Martín Maldacena

Juan Martín Maldacena è fisico teorico all'Institute of Advanced Study di Princeton. È conosciuto per i suoi contributi allo studio della gravità quantistica e della teoria delle stringhe. Nel 2012 ha ricevuto il premio per la fisica fondamentale assegnato dalla Fondazione Milner.



All'inizio del XX secolo in fisica ci furono due rivoluzioni: la meccanica quantistica e la relatività generale. La meccanica quantistica ci ha dato le leggi che governano il comportamento del mondo microscopico. La relatività generale, formulata nel 1915 da Albert Einstein, è una teoria dello spazio e del tempo, secondo cui lo spazio-tempo è curvo e ha una sua particolare dinamica. Finora tutte le previsioni di entrambe queste teorie sono state confermate dagli esperimenti. Tuttavia, di solito applichiamo l'una e l'altra a fenomeni molto diversi. Siamo soliti usare la meccanica quantistica per descrivere il comportamento di oggetti estremamente piccoli, come atomi o fotoni, mentre usiamo la relatività generale per studiare come cambia la geometria dello spazio-tempo in presenza di corpi di massa molto grande, per esempio stelle o galassie.

Per fare ricerca su sistemi fisici molto piccoli e con molta massa, come l'universo pochi attimi dopo il big bang, dovremmo avere a nostra disposizione una descrizione quantistica dello spazio-tempo. È passato un secolo da quando Einstein ha formulato la sua teoria, e questa rappresenta ancora una delle sfide più grandi con cui si confronta la fisica fondamentale.

Anni fa, motivati da un dibattito recente che trattava le proprietà dei buchi neri, il fisico Leonard Susskind della Stanford University e l'autore di questo articolo hanno proposto un collegamento fra due fenomeni apparentemente paradossali che si verificano in meccanica quantistica e nella relatività generale: *entanglement* quantistico e *wormhole*. Il primo fa riferimento a un tipo di correlazione quantistica che può verificarsi tra due sistemi fisici distanti. I wormhole sono «scorciatoie» che compaiono in alcune soluzioni delle equazioni di Einstein e che mettono in collegamento regioni molto lontane dello spazio.

In seguito vedremo che i due fenomeni sono collegati. L'equivalenza può essere argomentata con una certa solidità per alcuni casi concreti in cui intervengono i buchi neri, ma sembra più generale. La nostra idea è che questo rapporto fra geometria ed

entanglement potrebbe costituire un principio a cui ogni teoria quantistica dello spazio-tempo, o di gravità quantistica, dovrebbe obbedire. Questo principio ha conseguenze profonde. Suggestisce che, in qualche modo, lo stesso spazio-tempo potrebbe emergere a partire dall'entanglement quantistico di costituenti microscopici più fondamentali.

È curioso che sia l'entanglement quantistico sia i wormhole risalgono a due articoli scritti dallo stesso Einstein nel 1935. Questi due lavori sembrano trattare fenomeni molto diversi, e di sicuro Einstein non sospettò mai che vi potesse essere un collegamento fra loro. Di fatto l'entanglement era una proprietà della meccanica quantistica che dava un enorme fastidio al fisico tedesco. Qui di seguito passeremo in rassegna entrambi gli articoli e spiegheremo il loro rapporto da un punto di vista moderno.

Buchi neri e wormhole

Una previsione sorprendente della teoria di Einstein sono i buchi neri. Questi oggetti si formano quando una gran quantità di materia si concentra in una piccola regione dello spazio. La materia non deve necessariamente essere speciale; per esempio po-

IN BREVE

Secondo la teoria generale della relatività materia ed energia modificano la geometria dello spazio. Cent'anni dopo la formulazione di questa teoria da parte di Albert Einstein, i fisici cercano ancora una descrizione quantistica dello spazio e del tempo.

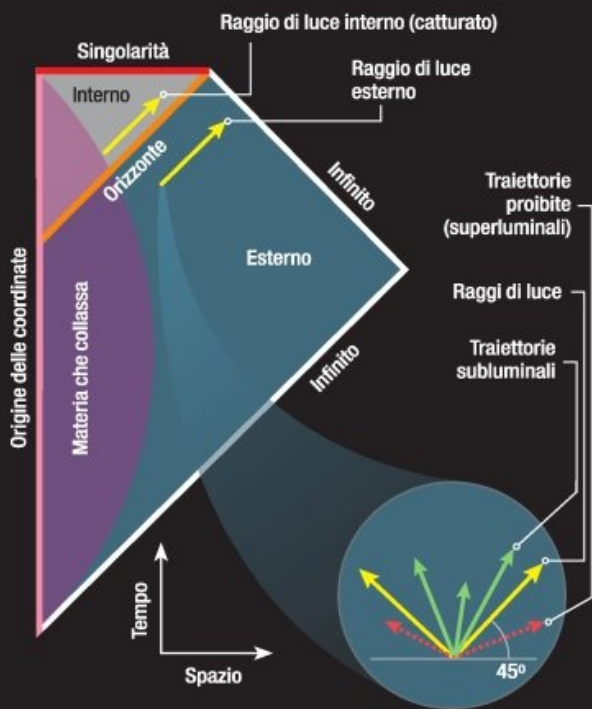
Meccanica quantistica e relatività generale prevedono due fenomeni che sembrano permettere la trasmissione istantanea di dati: entanglement quantistico e *wormhole*. Einstein studiò entrambi nel 1935, con i suoi collaboratori Nathan Rosen e Boris Podolsky.

Diversi lavori recenti hanno dimostrato che questi fenomeni sono collegati: in effetti l'entanglement può dare origine a una connessione geometrica fra regioni diverse dello spazio. Questa idea suggerisce un nuovo principio della gravità quantistica.

Causa ed effetto in un buco nero

I buchi neri (*a destra*) si formano quando una grande quantità di materia si concentra in una regione di spazio sufficientemente piccola. In questa situazione il campo gravitazionale della regione attorno alla materia diventa tanto intenso che nulla, neppure la luce, ne può sfuggire. La superficie oltre la quale è impossibile tornare indietro è chiamata «orizzonte degli eventi» (*in arancione*). Qualsiasi oggetto che attraversi l'orizzonte cadrà inevitabilmente in una singolarità, cioè una regione in cui la curvatura dello spazio diventa infinita (*in rosso, figura in basso*).

La struttura causale di un buco nero si rappresenta di solito con un «diagramma di Penrose» (*in basso*). In questi diagrammi l'asse verticale corrisponde al tempo e quello orizzontale alla coordinata radiale (le altre due direzioni spaziali vengono omesse). In ogni punto la scala è scelta in modo che i raggi di luce descrivano sempre rette a un angolo di 45 gradi. Qualsiasi traiettoria fisica passa necessariamente all'interno di questi «coni di luce». Quindi un evento che si verifica in una posizione e un determinato istante potrà avere effetto solo sui punti compresi all'interno del suo cono di luce futuro.



In un diagramma di Penrose tutto lo spazio fisico e tutto il tempo vengono rappresentati in un'area finita. Questo esempio rappresenta il collasso gravitazionale di una grande quantità di materia (*in rosa*) e la formazione di un buco nero.

tremmo creare un buco nero con l'aria. Tuttavia, questo sì, ci sarebbe bisogno di molta aria: bisognerebbe riempire una sfera delle dimensioni del sistema solare. Ma se così facessimo il sistema collasserebbe sotto il suo stesso peso, e si schiaccerebbe fino a formare un buco nero.

Ogni buco nero è circondato da una superficie immaginaria che si chiama orizzonte degli eventi. Diciamo che è immaginaria perché un astronauta che vi si trovasse in caduta libera non troverebbe nulla. Tuttavia, una volta attraversata, non potrebbe tornare indietro. Entrerebbe in una regione in cui lo spazio collassa verso una «singolarità», una zona in cui la geometria si chiude completamente. Avvicinandosi alla singolarità, l'astronauta morirebbe fatto a pezzi dalle forze gravitazionali.

Fuori dalla regione dove si trova la materia, un buco nero è descritto da una soluzione delle equazioni di Einstein che fu scoperta nel 1916 dal fisico tedesco Karl Schwarzschild. In origine la motivazione di Schwarzschild era trovare il campo gravitazionale generato da una massa puntuale. Di fatto, la sua soluzione non contiene materia: tutto quello che descrive è un campo gravitazionale puro con simmetria sferica. Anche se può sembrare una configurazione semplice, le proprietà di questo spazio-tempo si rivelarono abbastanza difficili da interpretare. Fino agli anni sessanta non si riuscì ad arrivare a una comprensione ragionevole della sua struttura completa.

Nel 1935, in uno degli articoli che abbiamo menzionato alla fine di questo nostro articolo, Einstein e Nathan Rosen, uno dei suoi collaboratori all'Institute for Advanced Study di Princeton, scoprirono un aspetto molto curioso della soluzione di Schwarzschild. Notarono che contiene due spazi indipendenti uniti attraverso una specie di «tubo». In un momento fissato la geometria si può visualizzare nel modo seguente: molto lontano dalla regione centrale lo spazio è piano (senza curvatura apprezzabile); via via che ci si avvicina al centro, però, la geometria si deforma e si collega con un secondo spazio che pure è asintoticamente piano.

La connessione geometrica che abbiamo appena descritto porta il nome di «ponte di Einstein-Rosen» (ER) o wormhole. I due fisici analizzarono la geometria di un'ipersuperficie in un momento fisso (ovvero uno spazio curvo di dimensione tre), anni prima che si arrivasse a capire la struttura completa della soluzione di Schwarzschild. La loro motivazione era trovare una descrizione geometrica delle particelle elementari priva di singolarità. Oggi crediamo che la loro interpretazione non fosse quella giusta.

Il ponte originale di ER collega due spazi indipendenti. Appare tuttavia possibile trovare geometrie simili in cui le due regioni collegate appartengono allo stesso spazio. Con alcune piccole modifiche, la soluzione di Schwarzschild può essere anche interpretata come una in cui sono contenuti due buchi neri molto distanti, uniti attraverso la loro parte interna. Immaginiamo di avere un buco nero qui e un altro in una galassia lontana. Un osservatore, che chiameremo Romeo, si trova in piedi a un metro dall'orizzonte degli eventi del primo buco nero, mentre Giulietta si trova a un metro dall'orizzonte del secondo. Se le parti interne dei due buchi neri sono collegate da un ponte di ER, la distanza fra Romeo e Giulietta attraverso il wormhole sarà di soli due metri, indipendentemente dalla distanza che c'è fra loro nello spazio.

Queste geometrie appaiono problematiche. Dobbiamo ricordare che uno dei principi della relatività ristretta è l'impossibilità di trasmettere segnali a una velocità maggiore di quella della luce. Tuttavia si direbbe che i wormhole ci permettono di superare questo principio, dal momento che potremmo usarli per trasmettere se-

gnali attraverso di loro. Nel 1962 però Robert W. Fuller, della Columbia University, e John A. Wheeler, della Princeton University, dimostrarono che i ponti di ER non si possono usare per mandare segnali di alcun tipo. Questo è dovuto al fatto che si tratta di geometrie dinamiche in cui il tempo svolge un ruolo importante. I nostri wormhole descrivono la geometria dello spazio in un attimo di tempo fisso. Questa geometria progredisce però con il passare del tempo. Fuller e Wheeler dimostrarono che un ponte di ER finisce sempre per «allungarsi», fino ad avere una lunghezza infinita, prima che un osservatore abbia il tempo di attraversarlo. Tutto questo è una delusione per i personaggi dei film di fantascienza, che di solito usano i wormhole per attraversare l'universo a velocità molto superiori a quella della luce.

Nel caso dei buchi neri collegati nella loro parte interna attraverso un wormhole, gli orizzonti si toccano per un attimo, ma poi si separano così rapidamente che diventa impossibile attraversare il ponte e arrivare dall'altro lato. Quindi, se Romeo cercasse di mandare un messaggio più veloce della luce a Giulietta, non ci riuscirebbe. Lancerebbe un razzo con il messaggio verso il suo buco nero e la capsula cadrebbe al suo interno. Ma, una volta dentro, i due orizzonti si separerebbero a tutta velocità e lo spazio collasserebbe molto prima che il messaggio riuscisse ad arrivare all'orizzonte di Giulietta.

Tuttavia Romeo e Giulietta avrebbero ancora una possibilità per vedersi. Potrebbero lasciarsi cadere all'interno dei rispettivi buchi neri e incontrarsi nella parte interna. Ma c'è un problema: una volta dentro, non ne potrebbero più uscire, e morirebbero quindi nella singolarità. Si tratterebbe letteralmente di un caso di «attrazione fatale». L'aspetto strano di questa geometria è che descrive due buchi neri che condividono uno stesso interno. Per questo Romeo e Giulietta si possono incontrare lì.

Bisogna sottolineare che questi wormhole sono molto diversi da quelli che sono mostrati nei film di fantascienza. Questi ultimi (che, invece, si potrebbero attraversare) richiedono un tipo di materia con energia negativa che non sembra compatibile con le leggi della fisica come le conosciamo. Per questo molti fisici credono che i wormhole della fantascienza non possano esistere in natura.

Un'altra sfumatura importante riguarda il tipo di buchi neri che stiamo considerando qui. I buchi neri che si formano a causa del collasso di materia corrispondono solo a una parte della geometria completa di Schwarzschild, dal momento che la presenza di materia modifica la soluzione. Questo caso si comprende molto bene, e in esso non c'è alcun wormhole. I buchi neri generati da processi astrofisici naturali, come il collasso di stelle, sono di questo tipo e non contengono wormhole che li possano mettere in contatto con altre regioni dello spazio e nemmeno fra loro, come accade nella soluzione completa di Schwarzschild. Eppure ci piacerebbe poter capire meglio l'interpretazione fisica dello spazio-tempo di Schwarzschild. Dopo tutto si tratta di una delle soluzioni più semplici delle equazioni di Einstein.

Correlazioni quantistiche

È sorprendente come l'interpretazione della soluzione di Schwarzschild sembri avere a che fare con l'altro articolo di Einstein che citavamo all'inizio. Questo lavoro oggi è molto famoso e influente. Fu scritto lo stesso anno insieme a Rosen e Boris Po-

Pioniere. Karl Schwarzschild, la cui soluzione alle equazioni della relatività generale aprì la strada allo studio dei buchi neri.



I wormhole di Einstein e Rosen sono molto diversi da quelli mostrati nei film di fantascienza, che richiederebbero un tipo di materia non compatibile con le leggi della fisica come le conosciamo

dolski, anche lui ricercatore dell'Institute for Advanced Study. Gli autori (oggi conosciuti con le loro iniziali, EPR) dimostrarono che la meccanica quantistica permette l'esistenza di strane correlazioni fra sistemi fisici lontani, una proprietà che più tardi sarebbe stata chiamata «entanglement».

Le correlazioni fra oggetti distanti si verificano anche nei sistemi classici. Immaginiamo di uscire con un guanto solo perché dimentichiamo l'altro a casa. Prima di guardare in tasca, non possiamo sapere quale guanto abbiamo preso. Però, una volta controllato, e verificato che abbiamo per esempio il guanto destro, sapremo subito che quello che è rimasto a casa è il nostro guanto sinistro.

Tuttavia l'entanglement implica correlazioni fra variabili quantistiche, che possono essere soggette al principio di indeterminazione di Heisenberg. Questo principio afferma che ci sono coppie di variabili fisiche che non possono essere conosciute nel-

Universi distanti e wormhole

Nel 1916 Karl Schwarzschild pubblicò una soluzione delle equazioni di Einstein corrispondente a un campo gravitazionale puro con simmetria sferica. Questa soluzione non contiene materia; rappresenta un caso idealizzato in cui c'è solo il campo gravitazionale. In seguito ci si rese conto che descriveva una singolarità e un orizzonte degli eventi: cioè un buco nero. Lo spazio-tempo di Schwarzschild nasconde però una struttura molto più ricca. Ne indichiamo le caratteristiche principali, a partire dal suo diagramma di Penrose.

Singolarità futura e passata

Lo spazio-tempo completo associato alla soluzione di Schwarzschild include due singolarità: una nel futuro lontano e una nel passato remoto. In altre parole, c'è una regione in cui lo spazio sta collassando verso una singolarità (un buco nero) e un'altra in cui lo spazio sta «spuntando», come se si trattasse di un'enorme esplosione. Ognuna di queste regioni è racchiusa da un proprio orizzonte degli eventi.



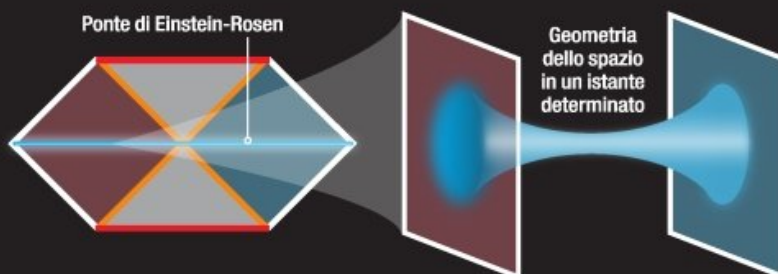
Diagramma di Penrose dello spazio-tempo di Schwarzschild

Universi sconnessi

Al di fuori degli orizzonti degli eventi, la soluzione completa di Schwarzschild descrive due spazi indipendenti. I raggi di luce non possono passare dall'uno all'altro, e quindi nulla di quello che si verifica in una delle due zone può avere effetto sull'altra.

Wormhole

Nel 1935 Einstein e Nathan Rosen scoprirono che la soluzione di Schwarzschild conteneva una struttura geometrica senza singolarità (riga azzurra, a sinistra) che collegava i due spazi distinti. Questo «ponte», detto anche «wormhole», descrive la geometria dello spazio in un istante di tempo fissato (destra). Non lo si può percorrere, perché per farlo sarebbe necessario viaggiare a velocità maggiore della luce.



Buchi neri collegati

Immaginiamo due osservatori, Romeo e Giulietta, uno in ognuno dei due spazi esterni. Ciascuno dei due osserverà un orizzonte degli eventi, e quindi un buco nero. Malgrado le regioni esterne appartengano a universi distinti, i due buchi neri condividono lo stesso interno, e quindi Romeo e Giulietta vi si potrebbero incontrare.



Soluzione idealizzata

La soluzione di Schwarzschild descrive un caso di grande interesse teorico, ma non si applica ai buchi neri del mondo reale. Questi ultimi si formano in seguito al collasso della materia, il che modifica la geometria della soluzione. Un buco nero astrofisico corrisponde solo a una parte della geometria di Schwarzschild; in particolare, non contiene wormhole che si colleghino con altri spazi.

lo stesso momento con precisione assoluta. L'esempio più famoso è quello della posizione e della velocità di una particella: se misuriamo molto bene la posizione di una particella, la sua velocità sarà incerta, e viceversa. Nel loro articolo EPR si chiesero che cosa sarebbe successo nel caso di due sistemi distanti, se in ciascuno si decidesse di misurare una coppia di variabili soggette al principio di indeterminazione.

L'esempio analizzato da Einstein, Podolsky e Rosen considerava due particelle con la stessa massa che si muovono in una sola dimensione. Chiamiamo queste particelle R e G , e prepariamole in modo che il loro centro di massa abbia una posizione ben definita, per esempio $x_{cm} = x_R + x_G = 0$. Possiamo anche fare in modo che la sua velocità relativa, $v_{rel} = v_R - v_G$, abbia un valore esatto; per esempio $v_{rel} = v_0$. Prima di andare avanti, bisogna chiarire una cosa. Qui stiamo specificando una posizione e una velocità in modo esatto. Ma questo non viola il principio di indeterminazio-

ne di Heisenberg? Ricordiamo che il principio si applica alla posizione di un sistema e alla velocità associata a questa posizione. Ma se abbiamo due sistemi diversi nulla ci impedisce di conoscere la posizione del primo e la velocità del secondo. Nel nostro esempio non stiamo determinando posizione e velocità del centro delle masse, ma la posizione del centro delle masse e la velocità relativa delle particelle. Dal momento che sono due quantità indipendenti, non vi è alcun problema a considerare uno stato iniziale come quello postulato da Einstein, Podolsky e Rosen.

Ora passiamo alla parte più sorprendente della faccenda. Supponiamo che le nostre particelle si trovino molto lontane una dall'altra, e che due osservatori distanti, Romeo e Giulietta, decidano di misurarne le posizioni. Bene, per come sono state preparate, se Giulietta ottiene il valore x_G , allora Romeo vedrà che la sua particella si trova in $x_R = -x_G$. D'altra parte, se entrambi misurano la velocità e Giulietta ottiene il risultato v_G , Romeo trove-

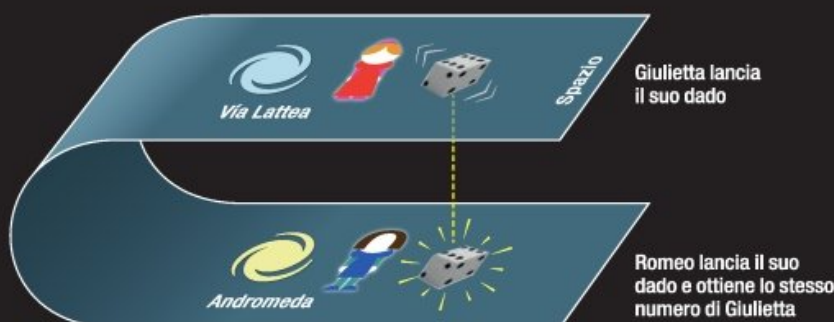
La colla quantistica dello spazio-tempo

Uno dei fenomeni meno intuitivi previsti dalla meccanica quantistica è l'entanglement, in cui sembra che le misurazioni effettuate su due sistemi quantistici distanti si coordinino istantaneamente (*in alto*). Nel 1935 Albert Einstein, Boris Podolsky e Nathan Rosen analizzarono le conseguenze di questo fenomeno in un articolo divenuto celebre.

Diversi studi hanno dimostrato che l'entanglement quantistico può produrre un collegamento geometrico tra regioni distanti dello spazio (*in basso*). Questo risultato suggerisce un principio generale della gravità quantistica. Lo spazio-tempo potrebbe emergere a partire dalle correlazioni quantistiche dei suoi componenti microscopici fondamentali.

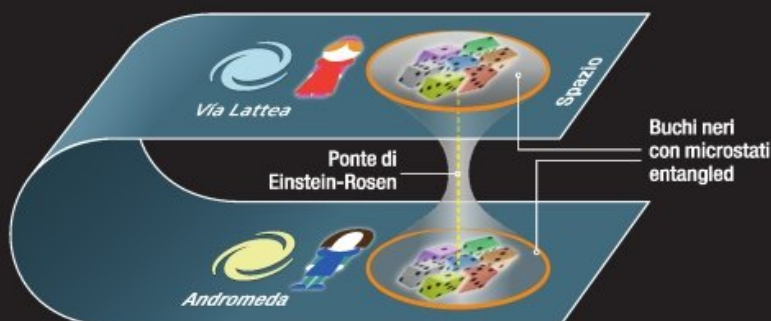
Entanglement quantistico

Due particelle entangled si possono pensare come due dadi che danno sempre risultati uguali. Ogni volta che Giulietta lancia il suo dado otterrà un numero casuale; il suo risultato sarà però correlato con quello ottenuto da Romeo. Diversamente da quel che si potrebbe pensare, l'entanglement non si può usare per inviare informazioni in modo istantaneo.



Collegamento geometrico

Romeo e Giulietta potrebbero produrre due buchi neri usando particelle entangled. Una volta formati, questi buchi neri resterebbero collegati attraverso il proprio interno da un wormhole, come accade nella soluzione completa di Schwarzschild. Non è possibile per Romeo e nemmeno per Giulietta attraversare questo collegamento geometrico per raggiungere l'altro lato, ma si potrebbero incontrare al suo interno.



rà certamente il valore $v_R = v_0 + v_G$. Naturalmente Romeo e Giulietta sono liberi di scegliere che variabile misureranno. Tuttavia, se Giulietta misura la posizione e Romeo la velocità, i loro risultati saranno completamente aleatori e non mostreranno alcuna correlazione.

La cosa strana è che se Giulietta decide di misurare la posizione della sua particella quella di Romeo avrà una posizione del tutto determinata una volta che si sappia il risultato della misurazione di Giulietta. E lo stesso accadrà con la velocità. Potremmo pensare che, quando Giulietta misura la posizione la particella di Romeo «sa» immediatamente che deve avere una posizione ben determinata. A prima vista questa sembra essere una trasmissione istantanea di informazione: ripetendo lo stesso esperimento molte volte, Giulietta potrà mandare a Romeo un messaggio composto di zeri e di uno decidendo di misurare la posizione o la velocità della sua particella. Romeo non sarebbe però in grado di leggere questo messaggio, a meno che non conosca il risultato delle misurazioni di Giulietta. In questo modo, le correlazioni dovute all'entanglement quantistico non si possono usare per mandare segnali più veloci della luce.

L'entanglement potrebbe sembrare una proprietà molto esoterica dei sistemi quantistici, tuttavia nel corso degli anni è stato con-

fermato in numerosi esperimenti. Negli ultimi due decenni le correlazioni quantistiche hanno portato a varie applicazioni pratiche e a grandi progressi in discipline come la crittografia e l'informatica quantistica.

ER equivale a EPR

Ritorniamo ora ai buchi neri. Nel 1974 il fisico e cosmologo britannico Stephen Hawking dimostrò che gli effetti quantistici fanno sì che i buchi neri emettano radiazione nello stesso modo in cui lo fa un corpo caldo. Questo significa che ai buchi neri è associata una temperatura, che è tanto più alta quanto più piccolo è l'oggetto. Di fatto, un buco nero può essere bianco. In pratica, un buco che abbia le dimensioni di un batterio, con un raggio simile alla lunghezza d'onda della luce nello spettro del visibile, si vedrebbe bianco a causa della radiazione di Hawking. Non emetterebbe molta luce; da vicino però si vedrebbe come un piccolo punto brillante. E con tutto ciò la massa di un buco nero di quelle dimensioni continuerebbe a essere enorme, paragonabile a quella di un continente, e quindi non si potrebbe usare come fonte di energia.

Nei buchi neri che si producono in modo naturale a causa del collasso delle stelle la radiazione di Hawking è così debole che,

in pratica, non è osservabile. Sono oggetti troppo grandi e troppo freddi per poter apprezzare questo effetto. Tuttavia, il fatto che ai buchi neri sia associata una temperatura implica conseguenze importanti.

Fin dall'Ottocento sappiamo che la temperatura è dovuta al movimento delle particelle microscopiche che costituiscono un dato sistema. Per esempio, in un gas appare come conseguenza dell'agitazione delle molecole. Quindi possiamo aspettarci che un buco nero abbia qualche tipo di particelle costituenti microscopiche in grado di assumere un gran numero di configurazioni possibili, ovvero di «microstati». Crediamo inoltre che, almeno visti da fuori, i buchi neri dovrebbero comportarsi come sistemi quantistici ordinari, soggetti a tutte le leggi della meccanica e della termodinamica.

In base a quanto detto, nulla ci impedisce di considerare stati di buchi neri legati da entanglement. Immaginiamo un paio di buchi neri molto distanti, ciascuno con un gran numero di microstati. Possiamo pensare a una configurazione in cui ogni microstato del primo buco nero si trovi in correlazione con il microstato corrispondente del secondo buco nero. In pratica, se osserviamo il primo buco nero in un microstato determinato, il secondo dovrà trovarsi esattamente nello stesso microstato.

La parte interessante è che, a partire da alcune considerazioni collegate con la teoria delle stringhe e con le teorie quantistiche dei campi, si può affermare che un paio di buchi neri con i loro microstati uniti in un entanglement in questo modo, cioè in uno stato di tipo EPR, produrrebbero uno spazio-tempo in cui un

tanglement. Questi buchi neri avrebbero un aspetto normale visti da fuori, per cui le famiglie non sospetterebbero nulla. Eppure, una volta creati, Romeo e Giulietta potrebbero lasciarsi cadere al loro interno e incontrarsi lì per l'ultima volta prima di morire nella singolarità.

Un principio universale?

Le idee che ci hanno portato fin qui sono state sviluppate nel corso degli anni da diversi ricercatori, a partire da uno studio del 1976 di Werner Israel, dell'Università dell'Alberta. Il nostro lavoro con Susskind ha avuto come spunto un paradosso ipotizzato nel 2012 da Ahmed Almheiri, Donald Marolf, Joseph Polchinski e James Sully, a quell'epoca tutti all'Università della California, a Santa Barbara. Contrariamente a quello che si era pensato fino ad allora, questi quattro ricercatori hanno affermato che l'entanglement quantistico obbliga a sostituire l'orizzonte degli eventi di un buco nero (una superficie priva di singolarità, secondo la teoria di Einstein), con una barriera impenetrabile ad alta energia (si veda *Anelli di fuoco* di Joseph Polchinski, in «Le Scienze» n. 562, giugno 2015). Nel contesto della relazione $ER = EPR$, sembra che questo paradosso si possa risolvere.

L'equivalenza tra ER ed EPR suggerisce che tutte le volte in cui si ha entanglement quantistico dovrebbe emergere una connessione geometrica. Questo si applicherà anche al caso più semplice, in cui ci sono solo due particelle collegate con un entanglement. In queste situazioni, però, la connessione spaziale potrebbe prevedere strutture minuscole e molto quantistiche, che non som-

miglierebbero molto alla nostra nozione corrente di geometria. Malgrado non si sappia ancora come descrivere queste geometrie microscopiche, l'idea è che la relazione $ER = EPR$ porterebbe a un principio che dovrebbe essere rispettato da tutte le teorie quantistiche sulla gravità. La teoria della gravità quantistica più studiata è la teoria delle stringhe. In questa teoria, la relazione $ER = EPR$ si può giustificare rigorosamente in alcuni casi in cui l'entanglement adotta una forma molto specifica, ma non

c'è ancora consenso sul fatto che questa equivalenza venga rispettata in tutti i casi.

Abbiamo visto che l'entanglement quantistico può, letteralmente, avvicinare due sistemi lontani. Sappiamo anche che due regioni vicine dello spazio sono collegate attraverso l'entanglement. Sembra naturale pensare che lo spazio-tempo, una struttura continua, deriverebbe a partire dall'entanglement, una proprietà profondamente quantistica. Questa idea si trova oggi al centro degli studi di molti ricercatori, ma ancora non è stata sintetizzata in una formulazione precisa. ■

PER APPROFONDIRE

Can the Quantum Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? Einstein A., Podolsky B. e Rosen N., in «Physical Review», Vol. 47, pp. 777-780, maggio 1935. Disponibile all'indirizzo: journals.aps.org/pr/pdf/10.1103/PhysRev.47.777.

The Particle Problem in the General Theory of Relativity. Einstein A. e Rosen N., in «Physical Review», Vol. 48, pp. 73-77, luglio 1935. Disponibile all'indirizzo: journals.aps.org/pr/pdf/10.1103/PhysRev.48.73.

Cool Horizons for Entangled Black Holes. Maldacena J. e Susskind L., in «Fortschritte der Physik», Vol. 61, pp. 781-811, settembre 2013. Disponibile all'indirizzo: arxiv.org/abs/1306.0533.

L'illusione della gravità. Maldacena J.M., in «Le Scienze», n. 449, gennaio 2006.

Teoria delle stringhe e teorie quantistiche dei campi ci permettono di affermare che l'entanglement quantistico produce una connessione geometrica tra due buchi neri

ponte di ER unisce la parte interna dei due buchi neri. In altre parole, l'entanglement quantistico produce una connessione geometrica fra i due buchi neri.

Tutto questo è stato definito come equivalenza fra ER e EPR , o $ER = EPR$, dal momento che mette in rapporto i due articoli che Einstein e i suoi collaboratori scrissero nel 1935. Dal punto di vista del paradosso EPR , le osservazioni realizzate sull'orizzonte di ciascuno dei buchi neri si trovano in correlazione a causa dell'entanglement quantistico. Dal punto di vista del ponte di ER , le osservazioni sono fra loro correlate, perché la distanza fra i due sistemi è piccola attraverso il wormhole. Per stabilire questa equivalenza è importante che non si possa inviare informazione attraverso il wormhole, dal momento che non si può inviare informazione nemmeno usando l'entanglement.

Pensiamo a un futuro molto lontano in cui due famiglie che sono in lotta fra loro cercano di tenere separati Romeo e Giulietta. Mandano Romeo nella galassia di Andromeda e trattengono Giulietta nella Via Lattea. Tuttavia permettono ai due amanti di spedirsi messaggi e coppie di sistemi quantistici *entangled*. Questo richiederebbe loro moltissimo tempo, ma siamo in un futuro in cui la speranza di vita è molto più lunga. Con pazienza, Romeo e Giulietta potrebbero creare due buchi neri collegati attraverso l'en-

La nostra impressione che l'universo sia una distesa ordinata in cui gli eventi avvengono in punti di uno spazio assoluto è un'illusione

di George Musser

Dov'è «QUI»?

All'inizio degli anni novanta, quando ho sentito parlare per la prima volta del fenomeno quantistico noto come non località, facevo il dottorato. Ma non me ne aveva parlato il mio docente di meccanica quantistica: non gli era sembrato neppure il caso di menzionarlo. Girando per una libreria mi era capitato di sfogliare un libro uscito da poco, *The Conscious Universe*, che mi aveva stupito con la sua affermazione che «mai nessun'altra scoperta ha messo tanto in difficoltà il nostro senso della realtà quotidiana» quanto la non località. Questo fenomeno aveva il sapore di un frutto proibito.

Nella lingua di tutti i giorni, «località» è un termine ricercato per indicare una zona, un centro abitato. Ma all'origine di questa parola, che risale al secolo XVII, c'è il concetto di «luogo». Qualsiasi cosa ha un suo luogo; possiamo sempre indicare un oggetto e dire: «È qui». In caso contrario quella cosa non esiste veramente. Se un insegnante chiede a un alunno dove sono i compiti e la risposta è che non sono da nessuna parte, sarà bene che il ragazzo dia qualche spiegazione.

Il mondo di cui abbiamo esperienza ha tutte le caratteristiche della località. Abbiamo un forte senso della posizione e dei rapporti fra posizioni diverse. Sentiamo con dolore la lontananza dalle persone che amiamo e l'impotenza di essere troppo distanti da

qualcosa su cui vorremmo intervenire. Eppure oggi diverse aree della fisica suggeriscono che, a un livello più profondo, posizione e distanza potrebbero non esistere. Alcuni esperimenti legano il destino di due particelle in modo che si comportino come monete di un gioco di prestigio. Se le lanciamo, ognuna darà come risultato testa o croce, ma sempre la stessa faccia della compagna. Agiscono in modo coordinato nonostante nello spazio che le separi non intervenga alcuna forza. Queste particelle potrebbero schizzare verso estremità opposte dell'universo e continuare ad agire all'unisono. Le particelle violano la località: trascendono lo spazio.

A quanto pare la natura ha trovato un curioso e delicato punto d'equilibrio: nella maggior parte delle situazioni obbedisce alla lo-

Adattato da *Spooky Action at a Distance: The Phenomenon That Reimagines Space and Time—and What It Means for Black Holes, the Big Bang, and Theories of Everything*, di George Musser, in accordo con Scientific American/Farrar, Straus and Giroux, LLC (US). Copyright © 2015 by George Musser. All rights reserved.



calità, e anzi deve obbedire alla località per permetterci di esistere, ma a livelli più profondi lancia indizi del fatto che sia non locale. Per chi la studia, la non località è la regina di tutti gli enigmi fisici, è implicata in un gran numero dei misteri che i fisici affrontano attualmente: non solo le stranezze delle particelle quantistiche, ma anche il destino dei buchi neri, l'origine del cosmo e l'unità essenziale della natura.

Per la maggior parte del XX secolo l'entanglement quantistico, la bizzarra sincronia tra particelle, è stato l'unico tipo di non località di cui si parlasse. È il fenomeno che Albert Einstein definì «inquietante azione a distanza». Ma via via i fisici hanno capito che ci sono anche altri fenomeni inquietanti in modo sospetto.

Per esempio Einstein ideò la sua teoria generale della relatività – su cui si basa la nostra conoscenza attuale della gravità – con l'esplicito intento di eliminare la non località dalla fisica. La gravità di Isaac Newton agiva a distanza, come per magia, e la relatività generale ha spezzato la bacchetta magica mostrando che è la curvatura dello spazio-tempo, e non una forza invisibile, a far emergere l'attrazione gravitazionale. Ma quali che fossero le intenzioni di Einstein la sua teoria cominciò a rivelare un aspetto diverso quando i fisici iniziarono a usarla. Il funzionamento della gravità si è rivelato costellato di fenomeni non locali.

Che cosa intendiamo con «qui»

Un giorno di autunno parlavo della gravità con Don Marolf, fisico dell'Università della California a Santa Barbara, mentre eravamo seduti nel centro studentesco del campus, a mangiare insalate e ad ammirare la laguna. Ehi, aspettate un attimo. Come faccio a sapere che ero seduto nel centro studentesco dell'Università della California a Santa Barbara un certo giorno d'autunno? Il principio di località afferma che io avevo una posizione, il centro studentesco aveva una posizione e quando queste due posizioni coincidevano, io ero lì. In effetti, le coordinate GPS del mio telefono corrispondevano con quelle del centro, e la data corrispondeva con quella del calendario sulla parete. Ma questa procedura in apparenza banale non regge a un esame approfondito. «Per formulare una domanda su «qui», dovremmo sapere che cosa intendiamo con «qui», e questo non è affatto facile», afferma Marolf.

Un'ovvia complicazione è data dal fatto che la California è attiva tettonicamente. La placca della crosta terrestre su cui si trova Santa Barbara si sposta di circa cinque centimetri ogni anno verso nord-ovest, relativamente al resto del Nord America e al reticolo nazionale di latitudini e longitudini. Quindi il centro studentesco non ha una posizione fissa. Se ci tornerò fra qualche anno e andrò alle stesse coordinate, mi troverò dentro la laguna. Le imprese di cartografia devono periodicamente effettuare rilevamenti delle zone tettoniche per tenere conto di questi movimenti.

Si potrebbe supporre che il centro studentesco abbia comunque una posizione definita in senso assoluto dallo spazio stesso. Spazio e tempo, però, non sono più stabili di una placca tettonica. Quando un corpo dotato di massa si sposta, invia vibrazioni per il *continuo*

George Musser scrive per «Scientific American» ed è autore di *The Complete Idiot's Guide to String Theory* (Alpha Books, 2008).



um spazio-temporale, riplasmandolo. Di conseguenza la posizione della mensa può cambiare anche se la placca resta immobile. È grazie a questo fenomeno, e non a una misteriosa azione a distanza newtoniana, che la gravità si comunica da un punto a un altro, secondo la teoria della relatività generale. Come le vibrazioni geologiche, anche le increspature gravitazionali si propagano a una certa velocità finita, e precisamente a quella della luce.

Per capire il mutamento di forma dello spazio-tempo la nostra mente deve scavalcare un ostacolo fatto di astrazione. Lo spazio-tempo non è tangibile come un paesaggio geologico. Non lo vediamo né tanto meno ne distinguiamo la forma. Eppure ne cogliamo impressioni indirette. Gli oggetti che si muovono liberamente nello spazio, non ostacolati da altri oggetti, sono come gocce di pioggia che scivolano su un parabrezza rivelando la curva del vetro: tracciano la forma dello spazio. Per esempio, per gli astronomi è abituale osservare raggi luminosi che partono paralleli, passano vicino a qualche grande massa, come il Sole, per poi intersecarsi. Libri di testo e articoli che descrivono questo effetto affermano spesso che la gravità del Sole ha deviato i raggi di luce, ma non è del tutto corretto. I raggi continuano a essere «rettilinei»: quello che ha fatto il Sole è alterare le regole della geometria, cioè deformare lo spazio, in modo che rette parallele possano intersecarsi.

Le deformazioni dello spazio e del tempo non riguardano solo la fisica più esotica, governano il moto di qualsiasi oggetto. Palle da baseball, calici, costosi *smartphone*: gli oggetti che ci scivolano di mano accelerano verso il pavimento perché la massa della Terra deforma il tempo. (La deformazione dello spazio svolge un ruolo secondario in questi casi.) «Giù» viene definito dalla direzione in cui il tempo scorre più lentamente. Le sveglie al livello del suolo ticchettano meno velocemente che in cima al monte Denali; se portiamo un orologio alla caviglia, rimarrà indietro rispetto a uno al polso. In termini umani le deviazioni sono minuscole, al massimo dell'ordine di una parte su milioni di milioni, ma sufficienti per spiegare come acquisiscono velocità gli oggetti che cadono. Quando vediamo una mela che cade da un albero, la osserviamo rotolare lungo il profilo del tempo.

La rivelazione della relatività

Sebbene la capacità dello spazio-tempo di cambiare forma faccia sparire quella non località di cui parlava Newton, ne genera un nuovo tipo. Emerge dalla novità principale della relatività: il fatto che non ci sono posizioni fuori dello spazio-tempo, non ci sono standard esterni o assoluti a cui fare riferimento. Questa affermazione apparentemente ovvia ha conseguenze degne di nota: ci dice che lo spazio-tempo non solo si deforma, ma perde anche

IN BREVE

Nella vita di tutti i giorni distanza e posizione sono concetti assoluti. La fisica, però, ci suggerisce adesso che al livello più fondamentale l'universo sia non locale, e non

esistano né posizioni né distanze. **La gravità** come concepita da Isaac Newton sembrava implicare il fenomeno della non località perché la forza attrattiva tra le masse

sembrava agire magicamente anche a grande distanza.

La relatività generale di Albert Einstein ha attribuito invece la gravità alla curvatura dello spazio-

tempo. Ha anche introdotto però un senso più profondo di non località mostrando che le posizioni dello spazio-tempo non hanno un significato intrinseco.

molte caratteristiche che gli attribuiamo, compresa la capacità di definire posizioni.

Sconfessando l'idea di una prospettiva «dall'alto», Marolf dice: «È un fatto molto sottile, e a dirla tutta anche Einstein non lo comprese per un bel po'». Le precedenti concezioni dello spazio, tra cui quella di Newton e addirittura le prime opinioni di Einstein, assumevano che lo spazio avesse una geometria fissa, per cui si poteva immaginare di innalzarsi al di sopra dello spazio e di guardarlo dall'alto. Anzi, in un certo momento Einstein asserì che doveva esserci un riferimento assoluto, altrimenti la forma dello spazio sarebbe stata ambigua.

Per capire perché emerge l'ambiguità, pensiamo all'idea che ci facciamo della geografia nella vita di tutti i giorni. Potremmo supporre che ci sia un'unica forma «vera» del paesaggio, quella che ci mostra Google Earth, ma nella pratica la forma è definita dall'esperienza di trovarsi all'interno di quel paesaggio, e questa esperienza può variare. Uno studente in ritardo a un esame, un atleta che zoppica per una storta, un professore che passeggia preso da una conversazione con un collega e un ciclista che grida ai pedoni di togliersi di torno percepiranno un campus molto diverso. Quella che per uno è una distanza breve può sembrare una traversata interminabile a un altro. Quando rinunciamo a una visuale dall'alto non possiamo più fare affermazioni definitive su che cosa sia dove.

Nel 1915, in un momento di rivelazione, Einstein capì che l'ambiguità non è un difetto, ma una caratteristica. Notò che già noi non osserviamo i posti in posizioni assolute: assegniamo invece le posizioni in base a come gli oggetti sono disposti l'uno relativamente all'altro e, cosa fondamentale, queste posizioni reciproche sono oggettive. Chiunque passeggi per il campus dell'università riconoscerà l'ordinamento dei vari elementi: porrà accanto il centro studentesco e la laguna e non le metterà in punti opposti del campus. Se il paesaggio si deforma o scorre, ma preserva queste relazioni, chi ci sta dentro non se ne accorgerà mai. E lo stesso avviene per lo spazio-tempo: osservatori diversi possono assegnare a uno stesso posto posizioni diverse, ma concorderanno sulle relazioni che i vari posti hanno tra loro. Sono queste relazioni che determinano gli eventi che si verificano. «Se George e Don si incontrano in un certo caffè a mezzogiorno nel primo spazio-tempo – mi spiega Marolf – lo faranno anche nello spazio-tempo rimescolato. È solo che nel primo caso sarebbe successo nel punto B, mentre nel caso rimescolato succede nel punto A».

La mensa, quindi, si trova in A o B o C o D o E, un'infinità di posizioni possibili. Quando diciamo che si trova nel tale posto usiamo una forma abbreviata per riferirci alle sue relazioni con altri punti di riferimento. In mancanza di coordinate assolute, la mensa va ubicata in base alle cose che ha dentro e attorno. Per localizzarla dobbiamo cercare un posto al mondo dove tavoli, sedie e bancone sono disposti in quel modo e dove un patio dà sulla laguna, immerso nella luce dorata della California. La posizione del centro studentesco non è una proprietà del centro stesso, ma dell'intero sistema a cui appartiene. «La tua domanda, in linea di principio, si riferisce all'intero spazio-tempo», dice Marolf.

L'ambiguità delle misurazioni localizzate è una forma di non località. Per cominciare, ci sono grandezze come l'energia che non si possono situare in un punto specifico perché non esiste un simi-

le punto specifico. Riferirci a una posizione particolare sarebbe impossibile come piantare una bandiera in mare. I punti dello spazio sono indistinguibili e intercambiabili. Dato che sono privi di attributi che li differenzino, quale che sia il materiale di cui è formato il cosmo, non risiede nei punti. Lo spazio non è in grado di sostenere alcuna struttura localizzata. Le grandezze gravitazionali devono essere proprietà dello spazio-tempo nel suo complesso.

Inoltre le molteplici forme equivalenti dello spazio sono descritte da configurazioni diverse del campo gravitazionale. In una configurazione il campo può esercitare una forza più intensa su un punto che in un'altra configurazione, con cambiamenti altrove per compensare e mantenere la disposizione relativa degli oggetti. I punti del campo gravitazionale devono essere interconnessi gli uni con gli altri, in modo da potersi spostare in giro pur producendo collettivamente la stessa disposizione interna. Questi collegamenti violano il principio per cui le singole posizioni dello spazio avrebbero un'esistenza autonoma. Marolf si esprime così: «Qualsiasi teoria della gravità non è una teoria di campo locale. Persino in ambito classico ci sono importanti equazioni che pongono vincoli. Il campo in questo punto dello spazio-tempo e il campo in quest'altro punto non sono indipendenti».

Nella maggior parte dei casi possiamo ignorare questa non località. Possiamo designare come punto di riferimento un pezzo di materia che abbiamo sotto mano e usarlo per ancorarvi un reticolo di coordinate. Possiamo prendere Los Angeles come centro dell'universo e definire tutti gli altri luoghi rispetto a esso. A questo livello possiamo vivere le nostre vite ignorando l'incapacità dello spazio di demarcare le posizioni. «Una volta fatto questo, la fisica sembra locale», dice Marolf. «La dinamica della gravità è locale. Le cose si muovono in modo continuo, limitato dalla velocità della luce». Ma le proprietà della gravità continuano a essere solo «pseudolocali». La non località c'è sempre, si annida sotto la superficie, emerge in circostanze estreme come i buchi neri.

In breve, la teoria di Einstein è non locale in un modo più sottile e insidioso di quanto fosse la teoria della gravità di Newton. La gravità newtoniana agiva a distanza, ma almeno operava nella cornice di uno spazio assoluto. La gravità einsteiniana non ha analoghi elementi magici; i suoi effetti increspano l'universo alla velocità della luce. Eppure demolisce la cornice, viola la località in quello che per Einstein era il senso più profondo: l'assunto che tutte le cose abbiano una posizione. La relatività generale smentisce la nostra immagine intuitiva dello spazio come una sorta di contenitore in cui trovano gli oggetti materiali e ci costringe a cercare un concetto nuovo di posizione. ■

La relatività generale ci costringe a cercare un nuovo concetto di posizione

PER APPROFONDIRE

Quantum Non-Locality and Relativity: Metaphysical Intimations of Modern Physics. Maudlin T., Wiley-Blackwell, 2011.

Nonlocality beyond Quantum Mechanics. Popescu S., in «Nature Physics», Vol. 10, n. 4, pp. 264-270, aprile 2014.

Nel sito web www.georgemusser.com si possono trovare filmati, articoli di blog e approfondimenti sulla non località.

Sfida quantistica alla relatività speciale. Albert D.Z. e Galchen R., in «Le Scienze» n. 489, maggio 2009.

La gravità quantistica a Flatlandia. Carlip S., in «Le Scienze» n. 526, giugno 2012.



La guerra dei telescopi

Vecchi rancori mettono in pericolo gli enormi telescopi necessari per una nuova epoca di scoperte astronomiche

di Katie Worth

Da 15 anni, tre gruppi di astronomi in competizione inseguono lo stesso sogno: costruire il più grande telescopio della Terra. I cicli astronomici che sperano di creare sarebbero grandi il triplo dei più grandi telescopi ottici attuali e così potenti da scattare fotografie di pianeti in orbita attorno ad altre stelle e scrutare praticamente all'estremo opposto dell'universo, risalendo indietro nel tempo fin quasi al big bang.

Di questo osservatorio ideale esistono tre versioni: il Giant Magellan Telescope (GMT), sviluppato da un consorzio che comprende tra gli altri la Carnegie Institution for Science; il Thirty Meter Telescope (TMT), sviluppato dal California Institute of Technology, dal sistema universitario della California e altri; e lo European Extremely Large Telescope (E-ELT), sviluppato dallo European Southern Observatory (ESO). Costruirli tutti e tre costerebbe quasi 4 miliardi di dollari, ma finora il mondo ha esitato e ha lasciato ognuno dei progetti a corto di fondi e in cerca di finanziamenti. Oggi potremmo avere almeno un telescopio gigante che scruta i cieli; invece, attrezzature incomplete attendono di essere consegnate a cantieri deserti.

Verosimilmente, tutti e tre i telescopi arriveranno zoppicando al traguardo e cominceranno le operazioni in qualche momento dopo il 2020, indietro sulla tabella di marcia e sfiorando i preventivi. Come è potuto succedere? Come hanno fatto tre progetti distinti con obiettivi comuni a contendersi i finanziamenti? E che cosa ha impedito loro di unire le forze per minimizzare il rischio di un fallimento collettivo?

Queste domande sono state poste ripetutamente, anche da una

perplesso commissione nazionale statunitense che doveva prendere in esame due dei telescopi per erogare finanziamenti federali. Decine di scienziati interpellati per questo articolo si sono chiesti che cosa sarebbe successo se invece di tre iniziative ce ne fossero state una o due. Quasi tutti sono dell'opinione che l'umanità sarebbe molto più vicina alla costruzione della nuova grande generazione di osservatori se i gruppi concorrenti di astronomi non avessero respinto ripetutamente la possibilità di collaborare. La concorrenza è iniziata nei primi decenni del Novecento ed è stata tenuta in vita nel corso degli anni da conflitti di personalità, fraintendimenti, tecnologie in competizione e un universo di astio sempre più ampio.

Sempre più grande

La storia inizia nel 1917, quando un ambizioso astronomo e direttore di osservatorio che si chiamava George Ellery Hale svelò un oggetto mai visto prima: un telescopio ottico da 100 pollici (circa 2,5 metri).

Quando si tratta di costruzione di telescopi, le dimensioni contano: più è grande lo specchio di un telescopio e più vede lontano.

Il nuovo telescopio, appollaiato sul monte Wilson, nella contea di Los Angeles, i cui cieli all'epoca erano ancora bui, era gigantesco rispetto a qualsiasi altro. Le sue dimensioni rivoluzionarie produssero rapidamente risultati straordinari. Edwin Hubble lo usò per scoprire che la nostra galassia è appena una tra molte e poi per avere le prove del fatto che l'universo si sta espandendo. Ma Hale non era soddisfatto: voleva un telescopio da 200 pollici.

Quello da 100 pollici era stato costruito e gestito dall'allora Carnegie Institution di Washington, un'istituzione benefica fondata dal magnate dell'acciaio Andrew Carnegie. Carnegie non era disposto a spendere altri milioni per un altro telescopio e quindi Hale sottopose astutamente il progetto a un'organizzazione fondata dal rivale di Carnegie, il barone del petrolio John D. Rockefeller. Nel 1928 Rockefeller in persona approvò il telescopio da 200 pollici di Hale, arrivando a dotarlo di un finanziamento di sei milioni di dollari, che all'epoca era la somma più elevata mai donata a un progetto scientifico.

C'era però una difficoltà: gli astronomi della Carnegie Institution erano gli unici al mondo con la preparazione per costruire il nuovo telescopio, ma Rockefeller non avrebbe finanziato l'istituzione del suo antico rivale. «Era semplicemente impossibile», spiega lo storico Ronald Florence, che ha scritto *The Perfect Machine*, un libro sul telescopio da 200 pollici. «Così si è preparato il campo per tutti i problemi».

Hale trovò una soluzione: Rockefeller avrebbe sborsato i fondi destinati al telescopio come dono al Caltech, che era stato appena fondato ad appena tre chilometri dal quartier generale dell'osservatorio della Carnegie, a Pasadena, in California. Il Caltech era ancora in uno stato così embrionale che tra i suoi dipendenti non c'era neppure un astronomo, e tanto meno aveva un dipartimento di astrofisica. Ciò nonostante, la Rockefeller Foundation finanziò la costruzione del nuovo telescopio di Hale da parte del Caltech, e dell'osservatorio Palomar nella contea di San Diego, che lo ospitava. Hale pensava che i dirigenti della Carnegie avrebbero trovato irresistibile la prospettiva di lavorare con uno strumento così magnifico e avrebbero messo a disposizione la loro esperienza per progettare e costruire il nuovo telescopio.

Si sbagliava. Secondo Florence, l'accordo fece infuriare il presidente della Carnegie Institution, John Merriam, che lo considerò un inganno imperdonabile. Si adoperò per affossare il progetto, rifiutando agli scienziati della Carnegie il permesso di collaborarvi e facendo pressione sulla Rockefeller Foundation perché lo abbandonasse. Disperato, Hale si appellò al diplomatico Elihu Root, vecchio amico sia di Rockefeller sia di Carnegie. Root convinse Merriam, che alla fine aderì al progetto.

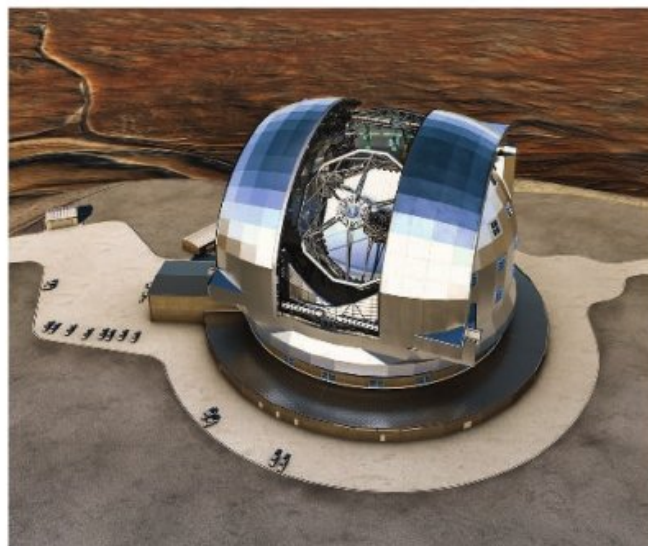
Ma il conflitto era solo agli inizi: Merriam era ancora in collera e cercò per anni di sottrarre il controllo al Caltech, spiega Florence, finché la sfiducia tra le due istituzioni divenne reciproca e profonda.

Quando Merriam andò in pensione, i due enti raggiunsero una sorta di tregua. La Rockefeller Foundation fece una proposta ai suoi avversari astronomici: nel 1949, quando il telescopio avrebbe

Katie Worth collabora con «Frontline», una trasmissione televisiva della WGBH di Boston. Si occupa in particolare di politica e scienza, e delle loro innumerevoli intersezioni.



Titani di vetro: Il Thirty Meter Telescope (a sinistra nella pagina a fronte) e il Giant Magellan Telescope (a destra) avranno circa le stesse dimensioni; l'European Extremely Large Telescope (sotto), più grande, avrà uno specchio di quasi 40 metri.



aperto il suo occhio di 16 piedi (quasi 5 metri), sarebbe stato di proprietà del Caltech, ma l'avrebbe gestito la Carnegie.

La fragile relazione tra i due enti si riversò inevitabilmente sul lavoro scientifico, specialmente dopo l'identificazione degli «oggetti quasi-stellari» – i quasar – all'inizio degli anni sessanta, da parte dell'astronomo olandese-statunitense Maarten Schmidt. All'inizio sembrarono solo stelle fioche, ma gli studi successivi mostrarono che i quasar risplendono di una luminosità quasi inimmaginabile dai remoti confini dell'universo. Questi oggetti misteriosi divennero presto l'argomento di punta della ricerca astronomica, e i ricercatori del Caltech e della Carnegie si contesero il tempo di uso del telescopio più grande del mondo per studiarli, facendo a volte ricorso a «dispettucci da scuola media», racconta Florence.

Nel 1979, dopo mezzo secolo di tensioni, il Caltech cercò finalmente di porre fine all'affido condiviso di Palomar. La separazione non andò bene e prese una piega molto personale. Allan Sandage, il leggendario astronomo della Carnegie, che aveva lavorato una vita a Palomar, rifiutò di rimettere piede nell'osservatorio. «Era quel tipo di divorzio in cui si deve scegliere tra marito e moglie», dice Florence. «Impossibile rimanere amici di entrambi».

IN BREVE

Attualmente sono in costruzione tre telescopi estremamente grandi, che dovrebbero entrare in funzione dopo il 2020.

Ognuno di essi avrà uno specchio principale di oltre 30 metri di diametro, consentendo agli

astronomi di studiare il cosmo con una chiarezza rivoluzionaria, senza precedenti.

Nonostante questo grande potenziale

scientifico, tutti e tre i progetti hanno problemi a trovare finanziamenti, spingendo molti a chiedersi

perché gli astronomi stiano costruendo tre telescopi giganti contemporaneamente anziché solo uno o due. La risposta viene da un'antica rivalità che risale ai primi grandi telescopi dell'inizio del Novecento.

Progetti in conflitto

Nei vent'anni successivi le due istituzioni seguirono percorsi separati distinti. Negli anni novanta il Caltech collaborò con l'Università della California alla realizzazione dei due telescopi gemelli Keck sul Mauna Kea, nelle Hawaii, usando l'allora nuovo modello di specchio segmentato in cui molti piccoli specchi formano un unico strumento ottico più grande. Il rischio valse la pena: il nuovo modello funzionò ottimamente e i gli astronomi delle due istituzioni godettero per anni di una situazione di privilegio scientifico, prima che chiunque altro costruisse uno strumento in grado di competere. Nel frattempo il Carnegie rimaneva fedele al-



la vecchia tecnologia a specchio singolo, ma si avventurò nell'emisfero australe, costruendo i telescopi gemelli Magellan da 6,5 metri nel deserto di Atacama, nel nord del Cile.

Nel 1999 la Carnegie era sul punto di completare questi telescopi, quando il Caltech e l'Università della California annunciarono la loro intenzione di costruirne uno da 30 metri. Mentre l'ESO, un'organizzazione sovranazionale di astronomi di tutta Europa, stava già pensando a qualcosa di ancor più ambizioso, con il nome appropriato di Overwhelmingly Large Telescope («telescopio smodatamente grande») e un diametro di 100 metri.

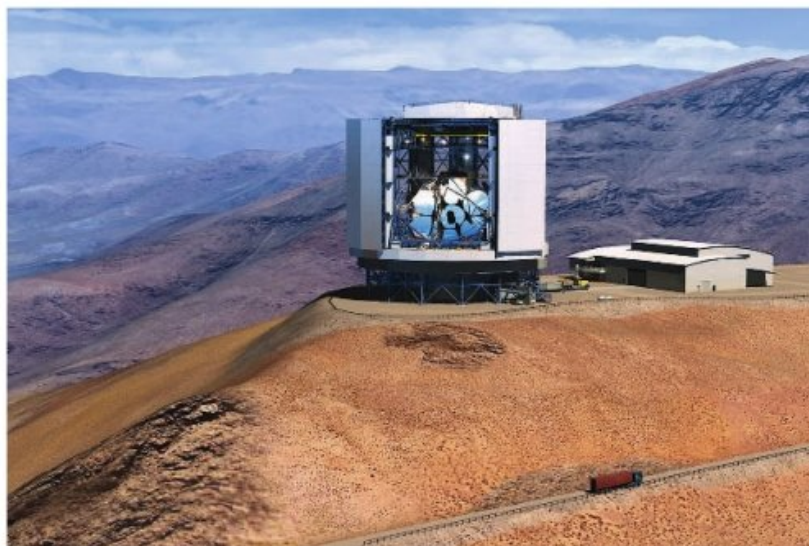
Secondo la maggioranza degli astronomi, fare il salto da un telescopio da 10 metri a uno da 100 metri era una pretesa eccessiva. Uno da 30 metri sembrava invece fattibile, con grande costernazione di Gus Oemler, all'epoca direttore degli osservatori della Carnegie, che ricorda di essersi sentito male all'annuncio del Caltech. «Ci stavamo affannando a finire i telescopi Magellan, che dopo tanti anni ci avrebbero finalmente permesso più o meno di raggiungere il Caltech, e da un momento all'altro stavano già cominciando la fase successiva.»

Dopo lunghe discussioni la Carnegie propose al Caltech di dar vita a una collaborazione. Entrambe le parti esitavano, ma i consigli direttivi delle due istituzioni ritennero che fosse giunto il momento di venirsi incontro e superare gli antichi risentimenti che le separavano. «Riconoscemmo che sarebbe stata una follia avere due telescopi giganti che facevano capo a due istituzioni che si trovavano a meno di tre chilometri l'una dall'altra» racconta Andrew Dressler, astronomo della Carnegie.

Così il 21 giugno 2000, due scienziati del Caltech – Wal Sargent, astronomo, e Tom Tombrello, che all'epoca dirigeva il dipar-

timento di fisica – e due del Carnegie – Oemler e Dressler – si incontrarono per discutere una collaborazione.

L'incontro andò malissimo da ogni punto di vista. La riunione fu tesa, confusa e piena di incomprensioni. Sia Wendy Freedman, che in seguito sarebbe divenuta direttrice degli osservatori del Carnegie, sia Richard Ellis, attualmente dirigente di ricerca dell'ESO, e che all'epoca era sul punto di sostituire Sargent come direttore dell'osservatorio di Palomar del Caltech, parlarono con tutti e quattro subito dopo la riunione e sentirono da ognuno una versione diversa. Secondo Dressler, quelli del Caltech non prendevano sul serio la proposta della Carnegie, mentre Tombrello credeva,



torto, che la Carnegie non avesse molti fondi da fornire. A detta di Oemler, Sargent rimase in un silenzio gelido per quasi tutto l'incontro; Sargent, a sua volta, avrebbe poi raccontato che era preoccupato di turbare i rapporti, all'epoca delicati, del Caltech con l'Università della California. Ma Sargent non aveva esposto questo cruccio nel corso della riunione, dice Ellis, e quindi «naturalmente, i rappresentanti della Carnegie si offesero».

Il giorno dopo Tombrello mandò un'email «per sintetizzare la nostra sconclusionata discussione». Per il momento il Caltech non era interessato a collaborare al telescopio insieme alla Carnegie, scrisse Tombrello, pur non escludendo la possibilità se il progetto si fosse rivelato dispendioso. Gli astronomi del Carnegie si sentirono trattati con degnazione e insultati. La collaborazione morì sul nascere, e la lunga tradizione di acrimonia tra le due istituzioni si perpetuò.

Quell'incontro è adesso entrato a far parte della mitologia dei grandi telescopi. Ellis è uno dei molti astronomi che si chiedono che cosa sarebbe potuto accadere se la riunione fosse andata diversamente.

«Quando ripenso a quel momento... che tragedia», dice. «Con qualche telefonata e un minimo di diplomazia avremmo potuto coinvolgere la Carnegie. E se l'avessimo fatto, probabilmente adesso avremmo un telescopio.»

Secondo Garth Illingworth, astronomo dell'Università della California a Santa Cruz, dall'antica rivalità rimaneva «giusto quel tanto di risentimento e infelicità» sufficiente a far deragliare una conversazione costruttiva. «Ti viene da pensare, accidenti, perché non c'era anche un adulto per dargli una mano ad andare d'accordo?»

Divisi si perde

Dopo questo tentativo fallito di distensione, la rivalità crebbe ulteriormente. Il Caltech e il sistema universitario della California svilupparono il TMT, da costruire accanto ai telescopi Keck alle Hawaii. Nel frattempo la Carnegie progettò il GMT, un telescopio da 24,5 metri, per coronare il proprio osservatorio di Las Campanas, in Cile. Più o meno nello stesso periodo, gli europei ridimensionarono i loro sogni dallo smodatamente grande all'appena estremamente grande, e pianificarono la costruzione dell'E-ELT da 39 metri in Cile.

I tre progetti girarono il mondo in cerca di finanziamenti, cercandoli a volte negli stessi posti. Elargiteci qualche soldo, diceva in genere la proposta, e ai vostri astronomi sarà garantito tempo di utilizzo del telescopio. Gli astronomi canadesi, per esempio, furono corteggiati sia dal gruppo Carnegie sia dal Caltech-U.C. e optarono per quest'ultimo. Anche all'Università di Harvard arrivarono proposte da entrambi, ma si impegnò con la Carnegie. In almeno un'occasione i due gruppi ebbero un imbarazzante incontro in aeroporto mentre erano in viaggio per incontrare gli stessi potenziali partner.

Nemmeno gli europei erano al di sopra della mischia: inizialmente ottennero l'appoggio del Brasile, il cui presidente acconsentì a entrare nell'ESO e a finanziare buona parte dell'E-ELT. Ma la frammentaria politica brasiliana bloccò l'accordo. La Carnegie si avvantaggiò dalle disgrazie dell'E-ELT: nel luglio 2014 l'Università di São Paulo entrò nel progetto GMT e, secondo Dressler, i responsabili del GMT speravano che il governo brasiliano aderisse presto a sua volta, anche se alla fine non andò così.

Il partner più ricercato di tutti era il governo statunitense, che avrebbe potuto aprire i forzieri dei fondi federali per finanziare un telescopio gigante e farvi accedere tutti gli astronomi statunitensi. Nel 2000 l'Astronomy and Astrophysics Decadal Survey, una commissione nazionale che si riunisce una volta ogni 10 anni e dà indicazioni per i finanziamenti federali statunitensi, aveva dichiarato che un telescopio gigante di nuova generazione era la massima priorità della nazione per l'astronomia ottica terrestre.

Avendo ricevuto questa raccomandazione, nel 2003 la National Science Foundation cominciò a prendere in esame una collaborazione con il progetto TMT del Caltech-U.C. Ma nel giro di qualche mese gli astronomi del GMT scrissero una lettera in cui dichiaravano che l'accordo avrebbe favorito indebitamente il TMT. La lettera fu efficace: la NSF si tirò indietro, non volendo prendere partito nella crescente ostilità politica dell'astronomia ottica ai massimi livelli.

In realtà, secondo il consulente della NSF Wayne Van Citters, non c'era comunque molto denaro federale da sborsare. Ma la contesa non aiutò, dice: «Sarebbe servito che la comunità si mettesse d'accordo e decidesse quale progetto preferiva. Non era possibile realizzarli entrambi».

La comunità, dal canto suo, cercò ripetutamente di farlo, ma senza risultati. Gli astronomi europei discussero la possibilità di collaborazioni con entrambi i rivali, ma alla fine raggiunsero solo un accordo per lo scambio di tecnologie. E nel 2007, su insistenza delle rispettive istituzioni, i dirigenti del TMT e del GMT tennero varie riunioni gelidamente cordiali per esaminare possibili modi in cui collaborare. Non ne venne fuori nulla.

La situazione lasciò perplessi i membri della commissione, che durante la riunione del 2010 cercarono di capire perché si chiedesse alla comunità astronomica statunitense di sostenere due grandi telescopi ottici distinti. Alla fine non raccomandarono nessuno dei due, rimandarono i progetti in fondo all'elenco delle priorità, di fatto bloccando i finanziamenti federali per altri 10 anni.

La rivalità non è rara nelle scienze: le menti brillanti vengono spesso insieme a un ego ingombrante che non disdegna lo scontro. A volte le contese possono spingere all'innovazione; altre volte possono trasformare la ricerca pura della verità in una serie di gretti conflitti personali. Alcune discipline sono riuscite a convincere i rivali a unire le forze: i fisici delle alte energie lavorano con gli acceleratori di particelle in grandi collaborazioni internazionali. I radioastronomi hanno cooperato in vista del più grande strumento di nuova generazione del loro campo, il Large Millimeter/submillimeter Array di Atacama da 1,4 miliardi di dollari.

Invece l'astronomia ottica statunitense è scissa dalla competizione. Nel luglio 2001, l'astronomo italoamericano e premio Nobel Riccardo Giacconi, in una conferenza alla National Academy of Sciences, definì la situazione come un problema sociologico.

Secondo lo storico W. Patrick McCray dell'Università della California a Santa Barbara, che ha scritto *Giant Telescopes*, un libro sulla comunità astronomica ottica statunitense, la cosa che colpisce nell'inimicizia tra il Caltech e la Carnegie è la longevità: bisticciano sui grandi telescopi fin dal 1928. «Viene da pensare: ma non avete imparato niente?» dice.

Ma la rivalità non spiega da sola questo stato di cose. L'astronomo Ray Carlberg dell'Università di Toronto, parte di una collaborazione che ha a che fare con il progetto TMT, fa notare che c'erano motivi razionali per lavorare su telescopi di-

stinti. Inizialmente gli astronomi credevano che ci sarebbero stati fondi per tutti e tre, e avere telescopi giganti sia nell'emisfero nord che in quello sud avrebbe garantito una copertura completa del cielo. «Il mondo aveva appena costruito vari telescopi da otto e da dieci metri, e non sembrava insensato che ce ne fosse più d'uno anche di questi grandi», dice Carlberg. Giunti al momento in cui fu chiaro che al Caltech avrebbe fatto comodo l'aiuto della Carnegie, questa era troppo avanti col proprio progetto per abbandonarlo.

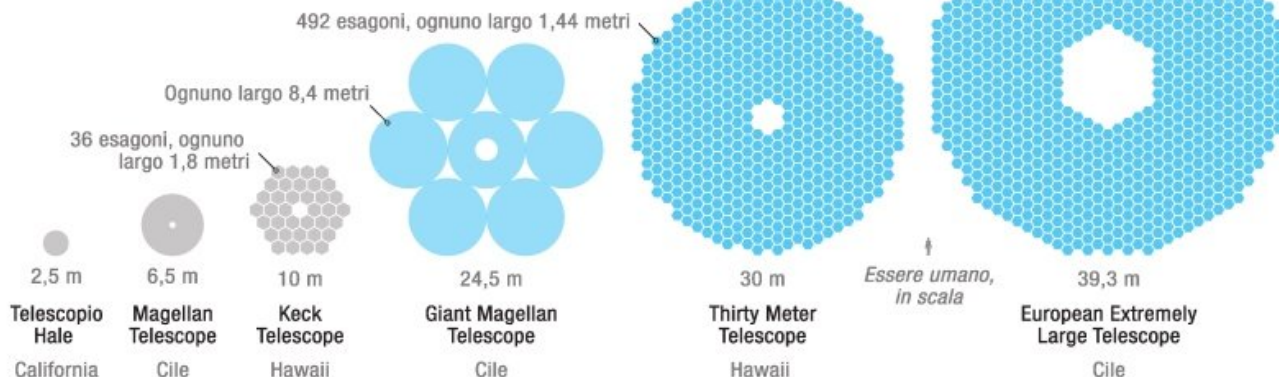
Troppi telescopi

Sull'isola maggiore delle Hawaii, un angolo dell'immensa vetta del Mauna Kea è stato spianato per ospitare il TMT. Lo specchio da 30 metri del telescopio, un diametro pari a quello della cupola del Campidoglio di Washington, sarà composto da un alveare di 492 componenti esagonali di 1,44 metri, contenuto in una struttura alta 18 piani sul vulcano inattivo. Il progetto ha già ottenuto i permessi per l'uso dei terreni, pur continuando ad affrontare ostilità e querele da parte di alcuni nativi delle Hawaii e ambientalisti [N.d.R.: lo scorso dicembre, una sentenza della Corte Suprema delle Hawaii ha nuovamente sospeso i lavori, ritenendo non validi i permessi]. Per contribuire al finanziamento di questa impresa da 1,5 miliardi di dollari, il Caltech e il sistema universitario della California hanno concluso accordi internazionali con l'India, la Cina, il Giappone e il Canada. Sono ancora alla ricerca di altri 270 milioni di dollari; le migliori stime attuali per l'inaugurazione del telescopio parlano di una data poco dopo il 2020.

Se i progetti per la costruzione dei telescopi fossero stati due invece di tre oggi sarebbero entrambi prossimi al completamento

Grande, più grande, grandissimo

I telescopi sono cresciuti di dimensione fin dal 1917, quando esordì il primo gigante, il telescopio di Hale da 100 pollici (circa 2,5 metri), che ora impallidisce rispetto ai grandi osservatori odierni, come i due telescopi gemelli Keck da 10 metri e i più modesti telescopi Magellan da 6,5 metri. I giganti di domani (*in celeste, sotto*) saranno ancor più grandi, con schiere di specchi che rasentano i 40 metri. Anche se questi giganti non saranno costruiti fino a dopo il 2020, gli astronomi stanno già pensando ai loro successori: telescopi da 100 metri.



A undici isolati dal quartier generale del TMT a Pasadena, la Carnegie e i suoi partner stanno cercando costruire il GMT da 24,5 metri. Sarà formato da sette specchi da 8,4 metri, con sei specchi disposti come petali di un fiore attorno a quello centrale: è un approccio molto diverso, e incompatibile, rispetto a quello del TMT con i suoi numerosi specchi esagonali più piccoli. Quattro specchi sono già stati costruiti in un laboratorio dell'Università dell'Arizona. Le dimensioni e la struttura più modeste corrispondono a un prezzo più modesto: poco meno di un miliardo di dollari. La Carnegie ha ottenuto il sostegno di alcune università della Corea del Sud, dell'Australia e del Brasile, nonché di varie statunitensi. Hanno raccolto circa metà della somma necessaria per costruire il telescopio nel sito dell'osservatorio di Las Campanas. Se tutto andrà come previsto, GMT comincerà le osservazioni entro il 2022.

Percorrendo per 12 ore la Panamericana da Las Campanas, si raggiunge il Cerro Armazones, la montagna deserta su cui sorgerà un giorno l'E-ELT. Il sito fu studiato inizialmente dagli astronomi del TMT, che passarono anni a esaminare la trasparenza e le turbolenze dell'atmosfera sopra il Cerro Armazones prima di arrivare alla conclusione che preferivano costruire nell'emisfero boreale; gli europei hanno tratto vantaggio da questo lavoro preliminare e si sono assicurati l'Armazones per il loro progetto. Oggi una strada asfaltata di recente porta alla nuda cima della montagna, che è stata spianata con la dinamite e con macchinari pesanti fino ad avere una sommità piana delle dimensioni di un campo di calcio. A est del monte il firmamento incontra il vulcano andino Llullaillaco, alto 6723 metri, dove un tempo gli Inca sacrificavano bambini agli dei. Il vulcano e il resto dell'arido panorama svaniscono al tramonto, cedendo il posto a un parco giochi di stelle in cielo.

Con uno specchio di 39 metri, l'E-ELT sarà in assoluto il più grande telescopio di nuova generazione. Come il TMT, l'E-ELT avrà una struttura composita, ma anziché 492 specchi esagonali, ne potrà vantare 798. Nel dicembre 2014 l'ESO ha votato per l'avvio della prima fase della costruzione. Per la seconda fase ancora

non sono disponibili i finanziamenti. La direzione dell'E-ELT prevede che il telescopio comincerà a scrutare il cielo nel 2024, per un costo complessivo di 1,1 miliardi di euro.

Una volta costruiti, i tre telescopi si potenzieranno a vicenda, spiega Roberto Gilmozzi dell'E-ELT. Il telescopio europeo si specializzerà negli «zoom», per fornire immagini ad alta risoluzione di regioni circoscritte del cielo; il GMT eccellerà nell'astronomia su ampie visuali. E il TMT si troverà in un altro emisfero, osservando così un cielo diverso.

Gilmozzi, come la maggior parte degli astronomi interpellati per questo articolo, ritiene che se ci fossero stati due telescopi anziché tre, ormai sarebbero entrambi vicini al completamento, con un risparmio di centinaia di milioni di dollari. «Se non consideriamo il problema di trovare i fondi, è meraviglioso averne più d'uno», dice. «Dal punto di vista scientifico, saprei che farmene anche di 100 telescopi, se mi potessi permettere di costruirli.»

Purtroppo, costruire i telescopi è solo il primo passo. Né il GMT né il TMT hanno i fondi per gestirli una volta costruiti. Entrambi sperano che le autorità federali prima o poi intervengano in loro aiuto, ma secondo Van Citters non è chiaro quanto denaro possano fornire gli enti pubblici. Si prevede che il funzionamento di ognuno dei telescopi costerà più di 25 milioni all'anno. «C'è di che farsi venire gli incubi», commenta McCray.

Eppure il problema dei troppi telescopi ha un risvolto positivo: un giorno il mondo potrebbe avere tre occhi giganti che scrutano il cosmo. Sarebbe una grande vittoria per la scienza, dice McCray. «Se questa situazione è una tragedia, è una tragedia con la "t" minuscola.»

PER APPROFONDIRE

Giant Telescopes: Astronomical Ambition and the Promise of Technology. McCray W.P., Harvard University Press, 2004.

I telescopi del futuro. Gilmozzi R., in «Le Scienze» n. 456, agosto 2006.

Osservatorio a nido d'ape. Irion R., in «Le Scienze» n. 508, dicembre 2010.



Mark Kinsinger e la sua sorella più giovane, Ruth (non sono i loro veri nomi), sono nati entrambi con la stessa malattia genetica. Mark, il cui disturbo non è stato diagnosticato fino all'età di quattro anni, ha sofferto un danno cerebrale irreversibile. Da allora un programma pilota di screening e interventi precoci ha prevenuto la patologia in altri bambini con la stessa condizione, compresa Ruth.

MEDICINA

Genomica per la comunità

Una clinica pediatrica creata e finanziata
dagli Amish e dai Mennoniti dimostra
che la ricerca genetica hi-tech può essere usata
già oggi per prevenire le malattie

di Kevin A. Strauss

Levi e Emma Kinsinger gestiscono una piccola serra nella Pennsylvania meridionale. Il 6 novembre 2002 hanno viaggiato per oltre 700 chilometri in taxi, andata e ritorno, per portare il figlio maggiore Mark alla Clinic for Special Children di Strasburg, in Pennsylvania. A quattro anni Mark era fragile e socialmente isolato. Stava sempre per terra, in preda a un movimento incessante. I suoi occhi guardavano intorno senza fermarsi e non reagiva ai suoni. Ogni tanto emetteva un rumore gutturale e si agitava violentemente. La domanda dei Kinsinger – che ho sentito un numero infinito di volte nella mia professione di pediatra – dava voce alla loro disperazione: «Che possiamo fare per aiutare nostro figlio?».

La nostra clinica è una casa per i bambini come Mark. (Per rispettare la privacy ho cambiato i nomi di tutti i pazienti e delle loro famiglie.) Il robusto edificio in legno, eretto da mani amish e mennonite, racchiude un moderno studio pediatrico equipaggiato con un arsenale di strumenti hi-tech per il sequenziamento genico.

Aiutiamo queste comunità religiose nordamericane che discendono dagli anabattisti europei, fuggiti tra il 1600 e il 1800 per cercare asilo religioso. Oggi vivono in piccoli insediamenti isolati in tutto il Nord America, e rifuggono dalla vita moderna. Tipicamente, elettricità e telefono sono banditi dalle loro case, il loro modo di vestire e i loro comportamenti sottolineano la coesione del gruppo, rifiutano assicurazioni sanitarie private e governative e guardano con sospetto le tecnologie che erodono l'interdipendenza all'interno della società.

Queste comunità hanno scelto di vivere diversamente nel mondo moderno, ma ogni genitore sa che cos'è il timore di un figlio malato: «Mia figlia camminerà mai?»; «Possiamo fermare le crisi epilettiche?»; «È autismo?». Sono queste le domande che ci spingono a tradurre il complesso linguaggio della biochimica e della genetica in risposte significative per bambini e famiglie. A oggi, il nostro laboratorio ha identificato più di 170 mutazioni geniche patologiche che sono presenti in modo sproporzionato in queste comunità cristiane. Quasi metà di esse influenza negativamente lo sviluppo del cervello e, se non curata, causa morte o disabilità nei bambini. Test molecolari rapidi ed economici aprono una finestra preziosa; ci permettono di mostrare minacce future per la salute e anticipare le malattie prima che si manifestino.

La nostra relazione con queste comunità cristiane fornisce anche indizi su come la genomica cambierà la nostra comprensione di malattie più comuni. Con la collaborazione di alcune famiglie Amish, recentemente abbiamo scoperto una variazione genetica che sembra collegata al disturbo bipolare (manico-depressivo), che colpisce tra il 2 e il 4 per cento della popolazione mondiale ed è ancora dolorosamente sottodiagnosticata e poco trattata. Correlare una variazione genetica al disturbo bipolare fa fare un passo alla genomica verso la medicina generale; sfida la comunità dei ricercatori a chiudere il divario tra ciò che sappiamo sulle cause della sofferenza umana e quello che possiamo fare per chi ha bisogno del nostro aiuto.

Avanti, un bambino alla volta

I Kinsinger avevano bisogno di chiarezza. In pochi giorni avevamo identificato nel sangue di Mark una costellazione di anomalie chimiche che indicavano come causa della sua malattia il deficit di un enzima, la 5,10-metilenetetraidrofolato reductasi (MTHFR). Il nostro direttore di laboratorio, Erik Puffenberger, evidenziò rapidamente un errore in entrambi i geni di Mark che codificano per la MTHFR. Questo risultato ci permise di diagnosticare tre altri bambini affetti dal problema nella stessa comunità dei Kinsinger.

Andai a leggere la prima descrizione della deficienza di MTHFR, pubblicata trent'anni prima da S. Harvey Mudd e colle-

Kevin A. Strauss, laureato in medicina alla Harvard Medical School, è direttore medico della Clinic for Special Children di Strasburg, in Pennsylvania.



ghi. Mudd è una leggenda nel piccolo mondo della ricerca sul metabolismo intermedio, il processo collettivo che converte il cibo in energia e negli elementi per costruire le cellule. Aveva descritto il cammino di trans-sulfurazione, un complicato network di reazioni biochimiche che ricicla un amminoacido essenziale, la metionina, e contemporaneamente fornisce gruppi metile (CH_3) alle molecole di tutto l'organismo. La metionina è indispensabile per la crescita del cervello e di altri tessuti, e i gruppi metile influenzano fortemente il funzionamento di questi tessuti. MTHFR è un anello essenziale nella catena chimica di rifornimento: senza questo enzima, Mark aveva subito le devastanti conseguenze cerebrali della privazione di metionina e CH_3 .

Chiamai Mudd, allora ricercatore emerito al National Institute of Mental Health. Generosamente mi aiutò ad addentrarmi nella complessità della trans-sulfurazione e suggerì una possibile terapia: la betaina, un farmaco da banco che porta la metionina e i gruppi metile al cervello seguendo una via metabolica alternativa, e può essere somministrata in polvere come integratore alimentare al costo di 60 centesimi di dollaro al giorno. Nei mesi seguenti feci spesso quattro ore di viaggio per raggiungere l'insediamento dei Kinsinger insieme a Christine Hendrickson, un'infermiera della clinica. Andavamo di fattoria in fattoria, valutando accuratamente l'effetto della betaina sui nostri giovani pazienti. Armati di un frigorifero a ghiaccio secco, una centrifuga portatile e un alimentatore collegato all'accendisigari dell'auto, trattavamo e congelavamo i campioni di sangue raccolti. Li portavamo a Mudd, che sfruttava il suo network per analizzare metionina, betaina e un insieme di altri composti nel cammino di trans-sulfurazione. Questa collaborazione ci permetteva di correlare le dosi di betaina con i suoi specifici effetti, e quindi stabilire un protocollo terapeutico che abbiamo pubblicato insieme nel 2007.

Dopo qualche settimana di betaina Mark fece i suoi primi passi e reagì a suoni e luci. Anche altri pazienti migliorarono significativamente e in tempi rapidi, ma imparammo una lezione importante sulla freccia del tempo biologico. Mark e gli altri bambini che avevano iniziato a prendere tardi la betaina avrebbero comunque sofferto danni permanenti, dovuti all'assenza di crescita del cervello durante l'infanzia. La densa matrice di connessioni neurali che si forma in questa finestra ristretta diventa un substrato durevole per la nostra vita mentale: una volta chiusa la finestra, il danno è fatto. Il caso di Mark evidenziò in tutta la sua durezza la tragedia di un'intera comunità. Nei trent'anni successivi alla pubblicazione di Mudd sul deficit di MTHFR, bambini come Mark vivevano e morivano nell'oscurità, tra confusione e dolore.

Mentre definivamo i dettagli della terapia svilupparammo un test

IN BREVE

La Clinic for Special Children di Strasburg, Pennsylvania, insieme alle comunità Amish e Mennonite a cui si rivolge, ha colmato il divario tra la crescente conoscenza della genetica umana e la sua traduzione

in cure mediche efficaci. **L'informazione genetica**, ottenuta con approcci hi-tech ma a basso costo, consente alla clinica no profit di diagnosticare e trattare efficacemente decine di condizioni

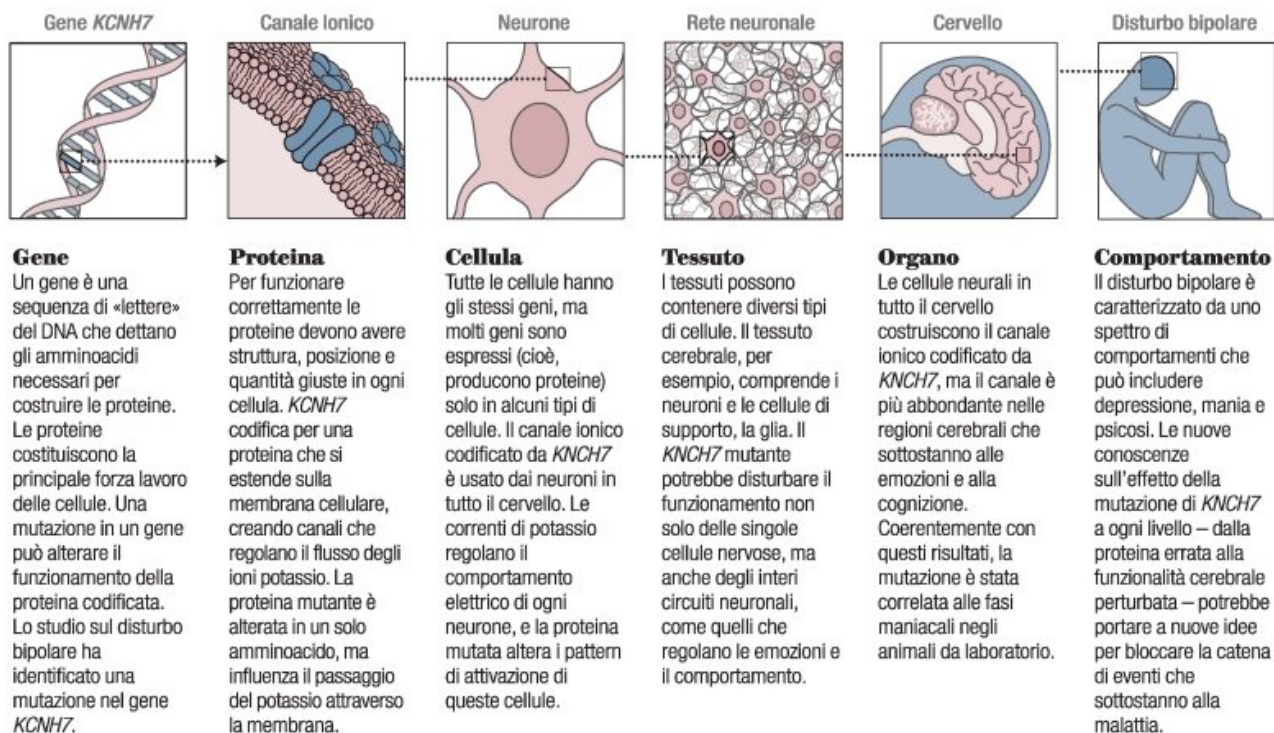
genetiche potenzialmente invalidanti o mortali. **La clinica è un modello** per migliorare le cure sanitarie in comunità poco servite in tutto il mondo.

Un recente studio promosso dalla clinica correla una mutazione genetica al disturbo bipolare, e mostra come la ricerca su comunità isolate possa arricchire le conoscenze e le terapie di malattie comuni.

Dalle mutazioni genetiche alla malattia

Le mutazioni possono perturbare la biologia a diversi livelli (molecole, cellule, tessuti, organi) e causare malattie. Alcune mutazioni sono particolarmente frequenti nelle popolazioni Amish e Monnonite. Per ogni paziente visitato dalla nostra clinica vengono usate tecnologie avanzate per identificare le varianti genetiche individuali, capirne la correlazione causale con la malattia, e cercare modi per alleviare o prevenire gli effetti negativi della mutazione.

Insieme a questo tipo di pratica, la clinica e i suoi collaboratori hanno recentemente identificato una mutazione correlata al disturbo bipolare negli Amish, e ora si sta finalmente comprendendo come questa mutazione ostacoli la regolazione emotiva (*in basso*). Questa scoperta può condurre a una maggiore comprensione del disturbo bipolare anche in altre popolazioni, e a nuove strategie per la prevenzione e le terapie.



per effettuare lo screening per lo stesso difetto genetico nelle giovani coppie: l'allarmante risultato fu che nella comunità dei Kinsinger il 30 per cento degli Amish sani portava una copia mutante di *MTFHR*. Da questa cifra era possibile inferire che un bambino su 50 sarebbe nato con la malattia. Nel 2003, riconoscendo il ruolo cruciale della terapia preventiva, contattammo il biochimico Edwin Naylor e il suo pionieristico laboratorio di screening neonatale di Pittsburgh. Insieme riuscimmo a sviluppare e implementare un metodo per identificare la mutazione *MTFHR* dai campioni di sangue essiccati su carta assorbente per ogni neonato, raccolti come parte di uno screening statale obbligatorio per varie malattie ereditarie.

Il primo bambino diagnosticato grazie a questo nuovo metodo fu proprio la sorella di Mark, Ruth, nata nel settembre 2003, dieci mesi dopo che i Kinsinger avevano portato per la prima volta Mark alla nostra clinica. Ruth cominciò la terapia a base di betaina già a due settimane di vita, e nei 12 anni di follow up è cresciuta molto bene: oggi è un'ottima studentessa, una figlia amorevole e una formidabile giocatrice di stickball.

Nel 2009, Mudd e sua moglie hanno incontrato i Kinsinger a una festa per il ventennale della clinica. Mentre i Mudd parlavano con i genitori di Ruth, lei si arrampicò in braccio a Mudd: per lui fu uno dei momenti più belli della sua carriera.

Mudd è scomparso nel gennaio 2014, a 86 anni. Alcune settimane dopo la sua morte, la vedova ricevette una cartolina fatta a mano: «Cara signora Mudd, i miei più cari auguri. Come sta oggi? Io sto bene. È un mattino nebbioso, e sembra che ci sia il sole. Non vedo l'ora di poter camminare scalza. Con affetto, Ruth».

Medicina genomica dal basso

L'incidenza insolitamente alta di deficit di *MTHFR* e di altre malattie genetiche tra Amish e Mennoniti è dovuta alla loro storia sociale e culturale. I piccoli gruppi di anabattisti sopravvissuti alle migrazioni transatlantiche componevano un misero pool genico. Come tutti noi, portavano con sé inconsapevolmente varianti dannose (comunemente chiamate mutazioni) del codice genetico. Nelle popolazioni isolate, queste varianti geniche possono propagarsi silenziosamente attraverso le generazioni, aumentando o diminuendo casualmente la loro frequenza, finché un bambino eredita due copie del cambiamento dannoso da genitori con un'ascendenza comune. Questo pattern ereditario recessivo è un meccanismo importante per le malattie genetiche nelle comunità isolate di tutto il mondo. Tra i moderni anabattisti, l'ancestrale costellazione di varianti geniche causa molta sofferenza individuale e collettiva, un problema aggravato dalla limitata istruzione scientifica e dallo scarso accesso al sistema sanitario statunitense.

I risparmi della prevenzione

I progressi della Clinic for Special Children nella gestione della cosiddetta malattia delle urine a sciroppo d'acero (chetoaciduria a catena ramificata o leucinosi; è detta MSUD dalle iniziali in inglese) illustrano concretamente i vantaggi economici dell'integrazione di biochimica e genetica nella pratica medica quotidiana. La MSUD è rara a livello globale, ma comune tra i Mennoniti della Pennsylvania, dove colpisce circa un nato su 380. È una malattia pericolosa: prima dell'apertura della clinica, nel 1989, il 39 per cento dei pazienti di MSUD moriva durante l'infanzia, e i sopravvissuti soffrivano di gravi disabilità mentali e fisiche.

I bambini con MSUD hanno un deficit dell'enzima necessario per degradare tre amminoacidi introdotti con l'alimentazione. Come conseguenza, alcune molecole raggiungono concentrazioni tossiche per il cervello, e quando sono in eccesso si riversano nell'urina conferendole il caratteristico odore di sciroppo d'acero. I bambini affetti sembrano normali alla nascita, ma tra i tre e i

cinque giorni diventano inconsolabili e mostrano forti spasmi muscolari involontari. Non trattato, l'accumulo delle tossine causa edema cerebrale, coma e morte.

Prima dell'apertura della clinica, i servizi sanitari per bambini con malattie genetiche rare e complesse erano terribilmente inadeguati nelle comunità rurali. Chi soffriva di malattie come la MSUD aveva cure frammentate, costose e inefficaci. A ogni crisi medica, le famiglie dovevano viaggiare per 100 o più miglia per raggiungere il centro medico accademico più vicino, dove rimanevano per settimane, pagando dai 50.000 ai 100.000 dollari per i servizi d'emergenza. Questa pratica schiacciava le famiglie mennonite con enormi debiti medici, ma non alleviava il peso della malattia.

Dal 1989, la nostra clinica ha gestito sin dalla nascita 80 pazienti mennoniti affetti da MSUD. Metà dei casi era stata diagnosticata sul posto, tra le 12 e le 24 ore dalla nascita, e poi spostato a casa in sicurezza. Il resto è stato diagnosticato grazie al-

lo screening statale obbligatorio, e mandato a casa dopo una media di cinque giorni. In oltre 25 anni, abbiamo fatto continui progressi nel monitoraggio e nella trattamento della MSUD, che comprendono test chimici casalinghi e a basso costo, sofisticate miscele nutrizionali intravenose, usate per ridurre il livello delle tossine, e nuovi tipi di latte artificiale progettati per ottimizzare l'ambiente chimico del cervello. Queste innovazioni hanno abbassato l'ospedalizzazione da 7 a 0,1 giorni per paziente per anno. Il calo del 98 per cento dei costi ospedalieri per tutti i pazienti che trattiamo consente alla comunità un risparmio di almeno 4,8 milioni di dollari, circa il doppio del budget della clinica.

Le tecnologie avanzate hanno la reputazione di essere proibitive dal punto di vista economico, ma il costo dipende in gran parte da come sono utilizzate. Investire risorse in diagnosi preventive e nella prevenzione delle malattie può essere un ottimo strumento per tagliare le spese non necessarie e inutili.

Nei primi anni sessanta del Novecento Victor McKusick, un pioniere della moderna genetica medica, riconobbe per primo le potenzialità dello studio delle malattie ereditarie tra gli Amish e diede il via a un ampio studio sul campo. Per quanto sospettosi dei possibili effetti negativi della tecnologia sui legami sociali, gli Amish aprirono le loro case a McKusick e al suo gruppo, nella speranza che le generazioni future potessero trarne benefici. Lo studio culminò nel 1978 con la pubblicazione del *Medical Genetic Studies of the Amish*, che catalogava 18 malattie genetiche note e 16 nuove patologie tra gli Amish del Nord America. Questi primi studi hanno individuato molti dei punti chiave delle malattie genetiche umane ma hanno potuto far poco per aiutare la popolazione studiata. Molti Amish svilupparono un'avversione nei confronti di questi dottori che si occupavano della trasmissione delle loro malattie, ma non erano capaci di aiutarli o non ne erano interessati.

Una decina d'anni più tardi un giovane medico di nome D. Holmes Morton affrontò il problema diversamente. Nel 1988, mentre era ricercatore di genetica biochimica al Children's Hospital di Philadelphia, un collega gli chiese di analizzare un campione di urine di un bambino Amish di sei anni, Danny (il suo vero nome), che aveva subito un'improvvisa e inspiegabile regressione motoria all'età di 14 mesi. I dottori locali parlavano di paralisi cerebrale, ma Morton, usando la spettrometria di massa e la gascromatografia, individuò nel campione una sostanza detta acido 3-idrossiglutarico. Questa impronta biochimica specifica indicava come causa del danno al cervello di Danny una rara malattia genetica chiamata aciduria glutarica di tipo 1 (GA1).

Morton andò a trovare Danny a casa sua nella Contea di Lancaster, dove seppa delle molte lettere scritte dalle famiglie riguardo i loro bambini con la cosiddetta paralisi cerebrale Amish. Nel 1991 lui e i suoi colleghi riferirono in un articolo di 10 casi certi di GA1 tra gli Amish, raddoppiando il numero dei casi pubblicati in

tutto il mondo. Ascoltò storie strazianti da genitori caduti in uno stato di impotenza. Generazione dopo generazione avevano visto i loro bambini colpiti da una misteriosa malattia del cervello solo per essere vessati da un sistema medico troppo lontano, frammentato e costoso per aiutarli. Questa costante ruota dell'angoscia convinse Holmes e sua moglie Caroline della necessità di una clinica locale, dove le famiglie non assicurate delle comunità anabattiste potessero portare i loro bambini speciali per cure amorevoli e alla loro portata.

Cominciò così un esperimento di sanità essenzialmente diverso dal sistema sanitario statunitense, che è basato sul profitto: una collaborazione dal basso tra i Morton e un piccolo gruppo di genitori impegnati, che conoscevano di prima mano il dolore inflitto da una malattia genetica. Un contadino Amish che aveva due nipoti affetti da GA1 offrì due acri e mezzo dei suoi campi per ospitare la clinica. Altri membri della comunità offrirono il legname e la manodopera per creare la costruzione, che fu realizzata a incastro come da tradizione. Da allora le comunità anabattiste hanno continuato a sostenere il progetto come un importante investimento per i propri figli. Quasi il 75 per cento dell'attuale budget di circa 2,6 milioni di dollari viene da donazioni o altre opere di carità, tra cui oltre 850.000 dollari ottenuti con aste di beneficenza che offrono coperte, mobili, piante, pony, polli arrosto, dolci fatti in casa eccetera. Questo sostegno contribuisce a mantenere le tariffe di prestazioni cliniche e di laboratorio tra i 50 e 150 dollari per visita, circa il 70-90 per cento in meno di quanto richiesto per servizi simili negli altri centri sanitari.

Sin dall'inizio i Morton avevano visto che il modo più efficace per affrontare la GA1 e altre malattie era iniziare dai bambini sani, identificando il rischio genetico prima della comparsa dei sintomi, e fornendo servizi locali ben documentati per gli anni a seguire. Tuttavia le strategie preventive sono più facili da immagi-



Il bimbo mennonita in alto è affetto dalla chetoaciduria a catena ramificata o leucinosi (detta anche malattia delle urine a sciropo d'acero, o MSUD, si veda il box a fronte) e vive a 23 miglia dalla clinica. Il bimbo a destra è affetto da aciduria glutarica di tipo 1. La sua famiglia si è trasferita per essere vicina alla clinica.

nare che da realizzare. Ogni dettaglio è importante: una diagnosi genetica accurata non serve se arriva troppo tardi, e lo stesso vale per una buona terapia molecolare. La clinica è un luogo dove la scienza è sfruttata ai fini pratici, consentendo alle comunità di curarsi senza rischiare la bancarotta per ragioni mediche.

Al piano terra abbiamo una serie di strumenti per il sequenziamento genetico avanzato. Il team del laboratorio interno, guidato da Puffenberger, ha lavorato in stretta collaborazione con i medici della clinica per scoprire ogni anno, dal 1998, tra le 5 e le 15 varianti geniche patologiche specifiche di questa popolazione. Strategie molecolari mirate hanno permesso al gruppo di diagnosticare con accuratezza gran parte delle malattie genetiche in meno di 24 ore, per 50 dollari. Una dettagliata informazione genetica ci permette di guardare nel futuro, comprendendo quando e come le malattie potrebbero manifestarsi, e intraprendere azioni per tenere i bambini al sicuro.

Nel caso della GA1, Morton ha collaborato con Naylor per implementare nel 1994 uno screening neonatale elettivo a livello statale. Qualche anno dopo Stephen I. Goodman, della School of Medicine dell'Università del Colorado, ha decifrato le specifiche mutazioni sottostanti la GA1 «Amish», consentendo a Puffenberger di fornire test molecolari rapidi ed economici. Identificando i bambini affetti prima che la patologia si manifesti e intensificando le cure mediche siamo riusciti a ridurre il rischio di disabilità dal 94 al 36 per cento, ma soffrivamo ancora duramente ogni volta che un bambino subiva un danno al cervello.

Poi, nel 2006, ho lavorato insieme a Richard Finkel, fondatore della compagnia di integratori alimentari Applied Nutrition, per progettare quello che chiamiamo un «latte artificiale medicinale» (su prescrizione medica) per i neonati e i bambini con GA1. Sapevamo che la mutazione responsabile della malattia causa l'accumulo nel cervello di acido glutarico e altre tossine, prodotte a



partire dall'amminoacido lisina, e che la presenza di un altro amminoacido, l'arginina, può limitare la quantità di lisina nel cervello. Manipolando accuratamente le proporzioni di questi due amminoacidi nella dieta, con l'aiuto di simulazioni al computer, abbiamo pensato che fosse possibile ridurre l'assorbimento nel cervello della lisina e quindi limitare la produzione delle neurotossine.

Ho testato questo nuovo approccio su 12 bambini in un trial clinico condotto tra il 2006 e il 2011. I pazienti trattati mostravano metà della tossina escreta, un terzo dell'ospedalizzazione e la protezione completa dai danni cerebrali. Abbiamo pubblicato le nostre scoperte nel 2011, e finora abbiamo trattato 25 neonati con il latte artificiale medicinale su misura. I risultati sono durevoli: il tasso di danno cerebrale rimane sotto il 5 per cento e quasi tutti i bambini nati con la GA1 oggi crescono sani. Per molte altre malattie genetiche che trattiamo, innovazioni graduali nella diagnosi e nella terapia ci hanno permesso di ridurre i tassi di disabilità, ospedalizzazione e morte tra il 50 e il 95 per cento: un ottimo esempio di come la scienza guidata dalla coscienza può fare molto per prevenire l'infelicità umana.

Molte popolazioni, una biologia

Lo studio di malattie genetiche rare può giocare un ruolo speciale nella crescita delle scienze biologiche. Solo osservando le conseguenze mediche di una mutazione possiamo comprendere in pieno come il gene normale contribuisce alla biologia umana. William Harvey aveva adombrato il concetto nel 1657, quando suggerì che la ricerca sulle malattie rare fosse il modo migliore per rivelare i «segreti misteri» della natura, e quindi migliorare la pratica medica. Tre secoli e mezzo più tardi, traduciamo l'assioma di Harvey in termini moderni. Guardando da vicino all'interazione dinamica tra una variante genica rara e la salute mentale, recentemente abbiamo ottenuto nuove informazioni cruciali su



una delle malattie umane più comuni. Era un mattino autunnale quando ho incontrato per la prima volta Katie, una donna di circa quarant'anni che aveva accettato di partecipare al nostro studio sul disturbo bipolare tra gli Amish della Pennsylvania. Preferì incontrarci nel fienile dove suo marito David riparava piccoli motori. Pezzi di macchinari erano sparsi in giro, un disordine inatteso in un'officina Amish. Spesso David lavorava per due: il bipolarismo di Katie ha dominato la loro vita insieme, e David ha faticato da solo per crescere i loro cinque figli.

La malattia ha colpito Katie dopo la nascita del secondo figlio. Ha iniziato a parlare velocemente, e spesso seguiva pensieri casuali in modo illogico. Ogni tanto passava la notte sveglia a pulire e ripulire la casa: «Questi pavimenti sono lerci, lerci. Lerci!». Nei periodi oscuri che seguivano, Katie giaceva nel letto, disperata e tormentata dal senso di colpa. Voci familiari, del marito, dei figli, dei genitori, le sussurravano senza sosta: «non vali nulla». Ma la sua principale preoccupazione, ripetutamente espressa quando ci vedemmo la prima volta, era una massa che le riempiva l'addome e la tormentava senza tregua, un'allucinazione percettiva cronica che lei chiamava la sua «infelicità».

I disturbi mentali – tra cui il disturbo bipolare – sono comuni in tutto il mondo. Negli Stati Uniti le malattie psichiatriche costituiscono il 40 per cento delle infermità tra i giovani adulti, e i suicidi sono il doppio degli omicidi. Gruppi isolati come gli Amish offrono importanti vantaggi per la ricerca sull'ereditabilità delle malattie psichiatriche e di altre patologie. Uno studio di questo tipo, lo Studio Amish dei principali disturbi affettivi, è iniziato nel 1976 e sta seguendo numerose famiglie Amish con un'alta prevalenza di disturbo bipolare. In trent'anni, i soggetti di studio sono aumentati, fino a comprendere oltre 400 individui, e il gruppo rimane uno dei più intensamente studiati nella storia della genetica medica.

Il 31 ottobre 2011 io e Puffenberger siamo stati a un Family Meeting ospitato da Alan Shuldiner e dalla Amish Research Clinic dell'Università del Maryland. Ricercatori psichiatrici di punta si sono rivolti a un consesso di Amish preoccupati dalla salute mentale nelle loro famiglie e nelle loro comunità, riassumendo 35 anni di studi sul bipolarismo negli Amish con un messaggio deprimente: «non c'è molto di nuovo da dirvi». Tornando al parcheggio fui fermato da tre sorelle Amish la cui famiglia aveva partecipato per oltre vent'anni allo studio sul bipolarismo familiare. Nove su 11 tra fratelli e sorelle della loro generazione avevano passato

molta della loro vita adulta debilitati dalla mania o dalla depressione. Si chiedevano se la nostra clinica, che aveva la fama di affrontare problemi difficili, potesse aiutarle a capire se «fosse coinvolto qualche gene».

Era il momento giusto. Avevamo da iniziato poco a collaborare con il Broad Institute di Cambridge, in Massachusetts, per esplorare l'utilità del sequenziamento di tutto l'esoma per la ricerca sulle malattie genetiche rare nei bambini. L'esoma consiste di tutte le lettere – i nucleotidi – del genoma che vengono «lette» per costruire le 19.000 proteine del nostro organismo. Per quanto l'esoma rappresenti solo l'1 per cento del genoma umano, contiene gran parte dei cambiamenti genetici che possono causare le malattie, e il sequenziamento dell'esoma è al momento il metodo più efficiente ed economico per la scoperta della relazione tra geni e malattie.

La nostra clinica è storicamente indirizzata alla salute pediatrica, ma i disturbi psichiatrici pervadono ogni aspetto della vita familiare e comunitaria, e i nostri collaboratori di Cambridge ci permisero di conservare tre campioni di esoma di adulti Amish con disturbo bipolare. Tutti e sette gli individui condividevano una variazione molto rara nel gene che codifica la proteina KCNH7. Questa sostituzione di un solo nucleotide, detta mutazione di senso (*missense*), altera la struttura di KCNH7 in un amminoacido conservato attraverso l'evoluzione di molte diverse specie animali; i cambiamenti in queste regioni altamente conservate modificano spesso in modo critico il modo in cui funziona una proteina.

Nei due anni successivi Sander Markz e Michael First, del Dipartimento di psichiatria della Columbia University, ci hanno aiutato a espandere lo studio ad altri soggetti e a mettere a punto un metodo per categorizzare in modo rigoroso i loro sintomi. Infine, abbiamo avuto il privilegio di collaborare con i ricercatori del Weill Cornell Medical College, dell'Università della Pennsylvania, del Franklin & Marshall College del McKusick-Nathans Institute of Genetic Medicine. Questo approccio di gruppo ci ha permesso di seguire gli spostamenti della proteina KCNH7 nelle cellule, dimostrare che la sua forma mutante modifica il segnale elettrico nei neuroni, e stabilire un fondamento statistico per la nostra scoperta. Per la prima volta abbiamo identificato uno specifico cambiamento genetico che segnala una forte predisposizione per il disturbo bipolare tra gli Amish. Abbiamo pubblicato i risultati nel 2014, consentendo ai ricercatori in tutto il mondo di esplorare la connessione tra KCNH7 e i disturbi mentali in altre popolazioni.



I bambini curati alla nostra clinica hanno diversi seri problemi di salute, come aritmie cardiache (*immagini a fronte*), malformazioni cerebrali (*in alto a sinistra*), e deficit d'attenzione ereditari (*tutti e tre, a destra*).



KCNH7 è particolarmente abbondante nelle regioni del cervello che influenzano l'umore e la cognizione, dove forma canali che mediano il movimento del potassio attraverso le membrane cellulari. Queste onde passeggere di ioni, che attraversano membrane troppo sottili per essere viste, sono direttamente collegate a ciò che sentiamo e pensiamo. La nostra esperienza quotidiana si basa su di esse. È difficile immaginare segnali elettrochimici alla base della violenza, delle dipendenze, delle psicosi o dei suicidi. Tuttavia la nostra ricerca suggerisce che un piccolo cambiamento nella soglia e nel momento di attivazione di queste correnti ioniche può gettare un individuo in cicli ripetuti di mania e disperazione.

Riconoscere a livello genetico che la mente è incorporata in questo modo ci permette di comprendere la sofferenza mentale in termini concreti. La scoperta della mutazione in KCN7 è importante perché offre un punto fermo per discutere razionalmente tra scienziati e pazienti, e aiuta a eliminare lo stigma di colpa e vergogna che circonda la malattia mentale. Sul breve periodo, la conoscenza che collega la variazione genetica al disturbo bipolare può portare a cure mediche più efficaci e tempestive per persone come Katie. Nel tempo, si potrebbe riuscire a ideare farmaci che modulano i canali ionici KCN7, una forma di medicina di precisione che potrebbe aprire la strada a una nuova classe di farmaci per il trattamento del disturbo bipolare in tutte le popolazioni.

Tempo e opportunità

Lo studio della genetica del bipolarismo negli Amish è una parabola sul futuro della medicina: come potrebbe essere usata l'informazione genetica per prevedere il tuo futuro. Nella nostra clinica abbiamo un test semplice ed economico da effettuare sul sangue del cordone ombelicale, così da informarci sul rischio di disturbo bipolare con circa trent'anni di anticipo. Poiché i disturbi psichiatrici che emergono in età adulta sono spesso preceduti da pensieri e comportamenti erratici in gioventù, l'individuazione precoce di un fattore di rischio genetico può condurre a cure più efficaci e tempestive nel corso di tutta la vita.

Ma dobbiamo fare uno screening di massa tra gli Amish alla ricerca della variante patologica KCN7? Domande simili si stanno accumulando rapidamente, e riguardano tutti. Nell'esoma di qualsiasi individuo troviamo tra le 20.000 e le 40.000 deviazioni dalla cosiddetta sequenza nucleotidica normale. Il 20 per cento di queste variazioni del DNA hanno il potenziale per modificare la

funzione di una proteina, e circa 1000 di esse sono estremamente rare, addirittura uniche, individuali. Quanti di questi cambiamenti possono prevedere il tuo futuro? E in quel caso, che cosa possiamo o dobbiamo fare? La risposta dipende, in parte, da quale conoscenza riteniamo possibile per una persona in uno specifico momento. Questa è forse la chiave per il successo della nostra clinica: la conoscenza cumulativa di una popolazione – faticosamente acquisita in 25 anni – funziona come una stele di Rosetta. Permette di decifrare il significato dei dati genomici all'interno di uno specifico contesto sociale e quindi disegnare cure su misura per l'individuo: il giusto trattamento per la persona giusta al momento giusto.

In tutte le popolazioni, questo tipo di conoscenza profonda sull'azione dei geni consentirà di visualizzare i meccanismi cellulari nei dettagli più fini, così da capire come le diverse parti molecolari interagiscono in salute e malattia. Ma sono le persone, non le loro parti, che soffrono. I clinici e i biologi molecolari che lavorano fianco a fianco nella giusta misura, un paziente alla volta, possono inserire la genomica nell'armamentario del medico, consentendo strategie preventive piuttosto che reattive.

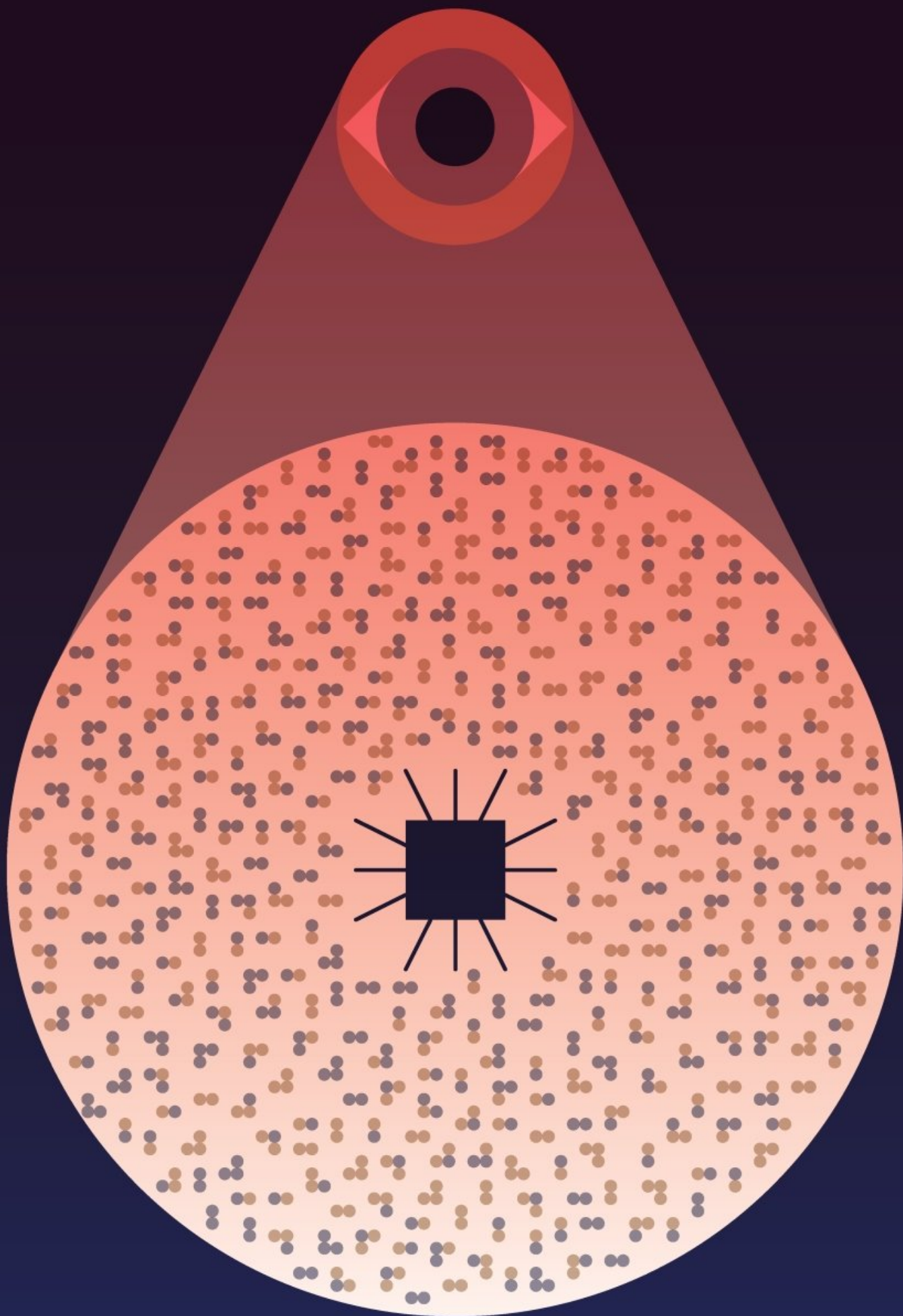
La pediatria è un buon posto dove mettere alla prova questa idea. Nella nostra clinica conoscenze e trattamenti crescono insieme, durante l'esplorazione delle complesse interazioni tra le variazioni geniche e l'ambiente che hanno luogo nelle prime fasi della vita. Prendersi cura dei bambini ci sfida a usare il potere predittivo della conoscenza genetica, concentrandoci sui risultati che più ci interessano. Un bambino alla volta, continuiamo a colmare il divario tra la ricerca genomica e la medicina quotidiana: nella nostra clinica, è un'impresa pratica, guidata dalle necessità di quel preciso bambino, in quel preciso momento. ■

PER APPROFONDIRE

Prevention of Brain Disease from Severe 5,10-methylenetetrahydrofolate Reductase Deficiency. Strauss K.A. in «Molecular Genetics and Metabolism», Vol. 91, n. 2, pp. 165-175, giugno 2007.

Genetics, Medicine, and the Plain People. Strauss K.A. e Puffenberger E.G., in «Annual Review of Genomics and Human Genetics», Vol. 10, pp 513-536, settembre 2009.

A Population-Based Study of KCN7 p.Arg394His and Bipolar Spectrum Disorder. Strauss K.A. e altri, in «Human Molecular Genetics», Vol. 23, n. 23, pp. 6395-6406; 1° dicembre 2014.



Rivelatore

di MALATTIE

Nuove minuscole sonde possono diagnosticare infezioni in 20 minuti abbattendo i tempi di attesa dei risultati e salvando vite umane

di Shana O. Kelley

Perché è così difficile diagnosticare con rapidità una malattia infettiva? Misuriamo segni vitali come temperatura o pressione sanguigna, ma non abbiamo un metodo veloce per individuare la causa della maggior parte delle infezioni. La nostra incapacità di identificare batteri e virus pericolosi costa cara ai pazienti. Nei tanti giorni di solito necessari ai medici per identificare batteri e virus, le malattie si diffondono e possono diventare difficili da curare; inoltre i pazienti più vulnerabili - neonati, anziani e chiunque abbiamo un sistema immunitario debole - possono morire.

Questi ritardi si verificano in presenza dei benefici che derivano dalla medicina ad alta tecnologia. Le conseguenze sono addirittura peggiori in piccole cliniche africane, dove possono essere necessari ancora più giorni per ottenere i risultati dei test. In questo arco di tempo, malati di malaria possono essere curati erroneamente per febbre tifoide, o malati di Ebola possono non essere identificati e dunque non essere isolati. I test procedono lentamente perché le impronte molecolari di specifiche infezioni sono nascoste nel corpo umano, offuscate da una gran quantità di proteine e particelle normali. In un campione di sangue possono esserci 1000 marcatori molecolari batterici specifici che fluttuano fra milioni di miliardi di molecole irrilevanti. Serve molto tempo

affinché apparecchi complessi e costosi, gestiti da scienziati specializzati in laboratori specializzati, trovino un gruppo abbastanza ampio di molecole bersaglio per far scattare un allarme.

Oggi siamo sul punto di fare molto meglio. Invece di sprecare tempo e mettere in pericolo vite umane, trasportando campioni dai pazienti ai laboratori, possiamo trovare molecole della malattia in modo immediato, identificandole nello studio del medico mentre il paziente aspetta 20 minuti. Possiamo farlo con sonde di dimensioni nanometriche, minuscoli sensori del diametro di pochi miliardesimi di metro chiusi in piccole cartucce di plastica. È sufficiente mettere una goccia di sangue nella cartuccia e ottenere i risultati. Queste sonde reagiscono rapidamente a bassi livelli di DNA batterico, in parte perché hanno più o meno le stesse dimensioni.

Le dimensioni contano. Una piccola onda non scuoterà una corazzata, ma farà ondeggiare una piccola barca a remi. Potrebbe far entrare spruzzi d'acqua oltre i bordi, allarmando le persone a bordo. Le nostre sonde nanometriche rispondono all'ambiente che le circonda, il fluido in un campione di sangue, in modi che non sarebbero rilevati da un sensore di dimensioni maggiori, e queste reazioni sono registrate rapidamente.

Io e i miei colleghi siamo entusiasti al pensiero che i nostri sistemi saranno testati nella pratica clinica quest'anno. E il nostro è solo uno dei numerosi e promettenti approcci diagnostici, sviluppati

IN BREVE

I classici test usati per diagnosticare le infezioni sono lenti, perché è necessario tempo per trovare abbastanza DNA proveniente da un organismo invasore.

Durante questa attesa che dura giorni è possibile che i pazienti assumano le medicine sbagliate, peggiorino la loro condizione o abbandonino le procedure di cura.

Nuovi dispositivi che sfruttano la chimica alla nanoscala potrebbero fornire risultati accurati nel giro di minuti, addirittura nell'ambulatorio di un medico.

da altri ricercatori che usano reazioni su scala nanometrica. Negli ultimi dieci anni gli scienziati hanno affinato metodi con cui modellare i materiali, spesso atomo per atomo. Laboratori di tutto il mondo usano questi sistemi altamente controllati per progettare dispositivi che reagiscano con più rapidità a inneschi altamente specifici, rispetto ai dispositivi precedenti più grandi. La cautela è d'obbligo, perché abbiamo visto quali siano i casi del mondo reale in cui i successi del nostro prototipo non sono stati all'altezza. Ma siamo anche fiduciosi nel fatto che alla fine questi metodi potranno aiutarci ad assistere i malati nel momento in cui è necessario.

In cerca di malattie

Il mio gruppo ha iniziato a lavorare in questo campo circa dieci anni fa. Ammiravamo gli schermi semplici, portatili e facili da usare dei pazienti con diabete. Essenzialmente, le molecole di glucosio completano un circuito nel dispositivo, cedendo elettroni e creando così una corrente elettrica. Più corrente significa più glucosio nel sangue. Ci siamo chiesti se non fosse possibile usare lo stesso approccio per misurare sequenze di DNA e RNA di origine batterica o virale che sono marcatori specifici di infezione.

Per centrare questo bersaglio dovevamo trovare un modo per attrarre e catturare molecole di DNA da patogeni che potrebbero trovarsi in un campione di sangue di un paziente. Andavamo a caccia, dunque avevamo bisogno di un'esca. Una caratteristica interessante di ogni molecola di DNA è la capacità di attaccarsi in modo molto aderente e selettivo a un'altra sequenza di DNA che possiamo progettare e sintetizzare in laboratorio. Per esempio potremmo creare una sequenza per catturare DNA da un ceppo batterico di stafilococco. Questo ci ha portato a individuare un'esca assai specifica. Abbiamo legato la molecola esca a un sensore, un cavo d'oro dello spessore di un millimetro, progettato per produrre corrente elettrica quando è colpito da DNA batterico. L'oro funziona bene perché è un buon conduttore di corrente.

Ma dato che il DNA di per sé non libera abbastanza elettroni per estrarre dal cavo d'oro una corrente elettrica rilevabile, abbiamo aggiunto un amplificatore. Abbiamo usato una molecola metallica, il rutenio, aggiungendola al campione. Questo metallo ha una carica elettrica positiva e quindi è attratto dal DNA che è carico negativamente. Se una molecola di DNA si legasse al sensore, anche il metallo si unirebbe al gruppo. Il complesso metallo-DNA afferra immediatamente elettroni dal cavo d'oro, il che inizia a far scorrere la corrente a un livello che possiamo rilevare. Usando differenti molecole esca sulla superficie dei sensori, potremmo individuare del DNA appartenente a diverse specie di batteri.

La cattiva notizia è che in situazioni simili a quelle reali il metodo non funziona. Funzionava abbastanza bene quando inserivamo grandi quantità di DNA batterico, migliaia di miliardi di molecole, nel campione. Poi però abbiamo provato il sistema con livelli di DNA molto vicini a quelli che si trovano in un campione di sangue che un medico può prelevare con la siringa. Di solito un simile campione contiene un migliaio di molecole bersaglio o meno. Abbiamo forzato la situazione a nostro favore, usando un milione di molecole bersaglio, ma non abbiamo ottenuto un segnale rilevabile. Eravamo ben lontani da dove avremmo dovuto essere.

Abbiamo trascorso un anno a esaminare tutte le variabili del sistema, cercando di capire perché non trovavamo un numero più piccolo di molecole. Era frustrante, inoltre nessuna modifica che ci veniva in mente rendeva il metodo più sensibile. Un paio di studenti del gruppo hanno di fatto abbandonato l'impresa e hanno chiesto di essere trasferiti su progetti diversi. Iniziamo ad avere

Shana O. Kelley è *distinguished professor* di chimica, biochimica, scienze farmaceutiche e ingegneria biomedica all'Università di Toronto. Dirige e detiene azioni di Xagenic, azienda che commercializza la tecnologia descritta in questo articolo.



dubbi anche io, e mi chiedevo se il mio gruppo di ricerca sarebbe sopravvissuto. Per fortuna è intervenuto il caso. Un giorno, nel 2004, discutevamo su come procedere in un progetto non collegato a questo e che richiedeva l'uso di oro ma su scala più piccola. Quei nanocavi in oro erano lunghi appena 10 nanometri (dieci milionesimi di metro), uno spazio che poteva ospitare solo cinque molecole di DNA. Così per divertimento – e visto che non funzionava altro – abbiamo sostituito i cavi d'oro di dimensioni millimetriche che usavamo con questi nanocavi, e abbiamo effettuato esperimenti sbrigativi per vedere se fosse successo qualcosa.

In effetti, qualcosa è successo. Rahela Gasparac, un ricercatore del mio laboratorio, è entrata nel mio ufficio, sventolando un foglio con i risultati del primo test. I nanocavi avevano aumentato di un milione di volte la sensibilità del test. Per un momento abbiamo pensato di festeggiare l'evento. Poi abbiamo capito che dovevamo ripetere gli esperimenti, così siamo tornati in laboratorio. Volevamo essere sicuri che quello che avevamo osservato fosse reale. Infatti lo era, sapevamo di avere in mano un modo per arrivare a quelle famose 1000 molecole che ci avrebbero permesso di diagnosticare le malattie.

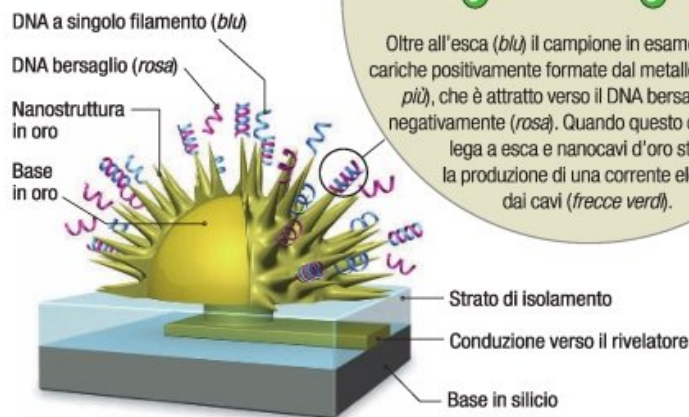
Come mai i nanocavi portano a una sensibilità per concentrazioni molto più basse di DNA? Perché le dimensioni hanno una profonda influenza sulla loro forma. Quando sono ridotti a dimensioni nanometriche questi cavi mostrano protuberanze acuminate che non si formano nei loro cugini più grandi, il cui volume conferisce loro una superficie piatta e liscia. Una molecola esca posizionata su un lato della protuberanza e un'altra molecola sul lato opposto hanno più spazio intorno a loro rispetto a quando sono ammassate insieme sul cavo piatto e più largo. Un fluido potrebbe muoversi più facilmente in questo spazio, portando con sé le molecole bersaglio, ed esca e bersaglio avrebbero assai più opportunità di entrare in contatto reciproco.

Queste sonde funzionavano bene, ma i nostri studenti ne potevano realizzare solo dieci al giorno. Per un reale uso clinico, avremmo avuto bisogno di migliaia di esemplari. Quindi, come hanno fatto tanti scienziati e ingegneri nel momento in cui intendevano fabbricare un gran numero di dispositivi elettrici, siamo passati al silicio.

I chip in silicio possono essere equipaggiati con elettrodi e prodotti in massa. Volevamo prendere le protuberanze di dieci nanometri presenti sui nostri nanocavi – le collinette appuntite che aumentavano così tanto la sensibilità – e riprodurle su questo chip. Dopo circa sei mesi abbiamo trovato un buon modo per ottenere questo risultato, servendoci di un procedimento elettrochimico chiamato elettroplaccatura. Potevamo iniziare con una caratteristica più grande, di dimensioni micrometriche, nel silicio e usare poi l'elettroplaccatura per stratificare strati d'oro più sottili al di sopra. Invece di modellare nanocavi, abbiamo scoperto che era più rapido e semplice creare una sorta di cupola d'oro con molte spine. Fisando molecole esca a diversi lati delle spine, abbiamo riprodotto la separazione prodotta dalle protuberanze nei cavi originari. La chiave è stata la tempistica. Se avessimo lasciato che il processo

Un piccolo dispositivo

Un nanosensore che individua le poche molecole di DNA batterico che galleggiano in una goccia di sangue deve avere tre requisiti. Innanzitutto ha bisogno di un'esca, cioè di molecole che attraggano il DNA proveniente da batteri specifici. Poi ha bisogno di esporre l'esca su una superficie curva e irta di spine di dimensioni nanometriche, che sia dotata di uno spazio sufficiente fra le esche in modo da permettere ai bersagli di raggiungerle. Infine la coppia esca-bersaglio deve innescare una corrente elettrica che possa essere percepita da un sensore.



Superfici curve di dimensioni nanometriche diffondono molecole esca assai più lontano, aumentando la possibilità che molecole bersaglio le attraversino e vi aderiscano. Sensori più grandi hanno superfici piatte che portano le esche a essere troppo vicine le une alle altre.

elettrochimico continuasse per un po' di tempo, allora le caratteristiche sarebbero cresciute fino a una dimensione inutilizzabile. Riducendo il tempo, invece, le caratteristiche avrebbero raggiunto dimensioni nanometriche e si sarebbero arrestate.

Aumentare di scala

Negli anni seguenti abbiamo dimostrato di poter usare questi rivelatori per analizzare marcatori di malattie infettive causate da batteri patogeni, e di poterne stabilire presenza o assenza nel giro di 20 minuti. Questa inversione di rotta è stata importante: per essere usato con successo nell'ambulatorio di un medico, un test diagnostico deve fornire il risultato nel corso di una tipica visita di controllo. Un'altra caratteristica del nostro approccio è il *multiplexing*, cioè la capacità di cercare più batteri patogeni nello stesso tempo. Siamo riusciti a creare molteplici cupole d'oro sulla superficie dei nostri chip e ad attaccare un tipo diverso di molecola esca a ciascuna cupola. Questo ci ha permesso di depositare una singola goccia di sangue sul chip e di analizzarla in cerca di molti patogeni diversi. La maggior parte degli altri approcci può cercare solo un singolo tipo di DNA patogeno per volta. Uno dei nostri studi più ambiziosi ha cercato di identificare 20 tipi diversi di batteri in una volta sola, insieme ai segnali del DNA di cinque tipi

comuni di resistenza agli antibiotici. Siamo riusciti a trovarli con un'accuratezza del 99 per cento.

Per portare questa tecnologia fuori dagli ambulatori, abbiamo fondato un'azienda, Xagenic. L'azienda, di cui sono *chief technology officer*, ha preso il nostro chip sensore, lo ha rivestito con una cartuccia di plastica e ha fatto in modo di includere nella cartuccia tutto il necessario per effettuare un test diagnostico. L'accuratezza di queste cartucce nel trovare clamidia e gonorrea, due malattie trasmesse sessualmente, rappresenterà l'obiettivo principale dei trial clinici che inizieranno quest'anno.

I test coinvolgeranno medici con i loro pazienti in 20 diversi ambulatori. Se il primo stadio del trial sarà coronato da successo, prevediamo di sottoporre i dati alla Food and Drug Administration degli Stati Uniti chiedendo l'autorizzazione a mettere in commercio il prodotto.

Abbiamo molta competizione da altre nanotecnologie promettenti. Alcuni saggi possono identificare specifici tipi di cancro con un'accuratezza molto più elevata. Il gruppo di Chad A. Mirkin alla Northwestern University, per esempio, ha messo a punto nanosfere d'oro che reagiscono con il DNA tumorale addirittura prima che le cellule pericolose abbiano formato tumori. David Walt della Tufts University ha un sistema che conta il numero di marcatori molecolari di malattia in un paziente, caratteristica che può rivelarsi assai utile per la diagnosi e il monitoraggio di un tumore. Questi approcci, però, sono progettati per essere usati in test di laboratorio piuttosto che nell'ambulatorio di un medico.

Ma altre tecniche si concentrano su diagnosi «istantanee», ed è verosimile che possano diventare utili per la medicina di tutti i giorni. Il gruppo di Rustem Ismagilov al California Institute of Technology ha sviluppato un dispositivo *wireless*, SlipChip, che

permette di individuare il DNA senza bisogno di trasmissione di elettricità via cavo. A inizio 2015 Samuel Sia, della Columbia University, ha illustrato su «Science Translational Medicine» un minuscolo campionatore ematico che si collega a un telefono cellulare e usa i segnali provenienti dagli anticorpi per rilevare l'HIV.

Credo che una o più di queste tecnologie, o una tecnica differente di cui non conosciamo ancora le caratteristiche, alla fine funzioneranno abbastanza bene per la pratica medica quotidiana. A quel punto, le reazioni che avvengono su scala di milionesimi di miliardesimi di metro produrranno un miglioramento notevole nella salute dei pazienti.

PER APPROFONDIRE

Miniature Analytical Methods for Medical Diagnostics. Walt D.R., in «Science», Vol. 308, pp. 217-219, 8 aprile 2005.

Advancing the Speed, Sensitivity and Accuracy of Biomolecular Detection Using Multi-Length-Scale Engineering. Shana O. Kelley e altri, in «Nature Nanotechnology», Vol. 9, n. 12, pp. 969-980, dicembre 2014.

A Digital Microfluidic Device with Integrated Nanostructured Microelectrodes for Electrochemical Immunoassays. Rackus D.G. e altri, in «Lab on a Chip», Vol. 15, n. 18, pp. 3776-3784, 21 settembre 2015.

Cacciatore di microbi. Ecker D.J., in «Le Scienze» n. 560, aprile 2015.

Gli invisibili compagni delle radici

Da milioni di anni le piante affrontano le difficoltà dell'ambiente unendo le forze con altri organismi del suolo ora al centro dell'attenzione

di Paola Bonfante, Elisa Dell'Aglio e Veronica Volpe

Nessun uomo è un'isola, scriveva il poeta John Donne nel 1624. Non si sbagliava. Anche il peggiore dei misantropi condivide il proprio spazio vitale con una vastissima comunità di microrganismi, dieci volte più abbondante delle stesse cellule umane: il microbiota. La maggioranza di questi ospiti, che includono batteri e funghi, non è dannosa: al contrario, contribuiscono alla corretta fisiologia del nostro corpo, per esempio mantenendo stabile il pH delle mucose, aiutando il processo digestivo o controllando il sistema immunitario.

Le vere regine delle associazioni con altri organismi sono però le piante. Si stima che la regione attorno alle radici, la rizosfera, sia tra gli habitat più popolati al mondo, e conti fino a milioni di cellule microbiche per grammo di radice. Non c'è pianta in natura che non conviva con molteplici specie di batteri e funghi filamentososi. Anche in questo caso, molti coinquilini non sono dannosi ma innocui o addirittura benefici e in alcuni casi danno origine a relazioni stabili con le piante dette simbiosi mutualistiche.

Era il 1884 quando lo scienziato tedesco Albert B. Frank descriveva per la prima volta sottili filamenti fungini, le ife, che crescevano attorno alle radici delle piante e penetravano al loro interno. Frank definì questa interazione pianta-fungo «simbiosi micorrizi-

ca» (dal greco *mikos*, fungo e *rhiza*, radice, si veda il box in basso a p. 80). Alcuni anni prima il russo Mikhail Woronin aveva scoperto che gli ingrossamenti radicali detti «noduli» delle leguminose (come la soia e il fagiolo) non erano formazioni patologiche ma un riparo per i rizobi, ovvero batteri simbiotici che hanno un ruolo importante per la produzione di azoto organico. Protetti dalla pianta che sopperisce al loro fabbisogno di composti zuccherini, i rizobi usano l'azoto atmosferico per produrre ione ammonio che poi va a far parte di amminoacidi e altre molecole che il batterio condivide con la pianta ospite.

Negli anni si è capito che micorrize e noduli radicali non sono eccezioni ma la regola. La simbiosi micorrizica coinvolge più



dell'80 per cento delle piante terrestri in tutti i continenti (comprese le piante che sfamano l'umanità come il riso o il grano, e gli alberi che costituiscono i polmoni verdi del nostro pianeta) e più di 6000 specie di funghi tra cui molti dei funghi che mangiamo, come i tartufi o i porcini. Per questa ragione si dovrebbe dire che la maggior parte delle piante non ha radici, bensì micorrize. I batteri simbiotici rizobi, invece, sono in grado di infettare solo le piante della famiglia delle leguminose, ma la rizosfera di tutte le piante è ricca di molti altri organismi batterici benefici.

Ma chi sono questi organismi simbiotici e qual è il loro ruolo ecologico? Per lungo tempo la difficoltà di distinguere i vari tipi di batteri e funghi filamentosi sulla base di caratteri morfologici ha rallentato lo studio della biodiversità microbica. Grazie alle nuove tecniche di sequenziamento dette di Next Generation Sequencing o NGS (si veda il box in alto a p. 80) da pochi anni è invece possibile rispondere in modo molto più approfondito alla domanda: «Chi c'è?» e ottenere una fotografia temporale e spaziale degli abitanti del suolo. I dati ottenuti dal sempre maggior numero di genomi microbici sequenziati (si vedano per esempio gli elenchi sul sito web del Joint Genome Institute) permettono inoltre di ipotizzare le funzioni svolte da ogni specifico microrganismo.

I primi due articoli sul microbiota batterico della rizosfera ottenuti con tecniche NGS sono apparsi contemporaneamente nel 2012 su «Nature» e riguardavano la pianta modello *Arabidopsis thaliana*, che non forma interazioni micorriziche. Gli studi erano quindi focalizzati sulle comunità batteriche.

Secondo i risultati di quelle ricerche, la radice e lo spazio della rizosfera di *Arabidopsis* ospitano una densità batterica molto più elevata del resto del suolo. La biodiversità è però dimezzata, con solo circa 1000 specie identificate in rizosfera e radice a fronte delle circa 2000 nei campioni di suolo. Nella radice si è notata in particolare un'elevata abbondanza di Batteroidi, Actinobatteri e specifici gruppi di Proteobatteri. Viceversa, altri gruppi, come gli Acidobatteri, sono abbondanti in suolo e rizosfera ma quasi assenti nella radice. Presi nel loro complesso questi risultati suggeriscono che la radice stessa operi una stretta selezione delle specie batteriche ammissibili al suo interno.

Risultati simili sono stati ottenuti da ulteriori studi su piante coltivate come mais, grano e riso. Sono però emerse anche importanti differenze sia quantitative sia qualitative tra le specie batteriche preponderanti in radice e rizosfera a seconda della pianta analizzata, del tipo di suolo e delle condizioni di coltura.

L'anno scorso John Davison e colleghi dell'Università di Tartu, in Estonia, hanno invece usato le tecniche di NGS per studiare la distribuzione su scala mondiale del gruppo dei funghi simbiotici più diffusi in natura, i Glomeromycota, che formano con le piante la simbiosi micorrizica arbuscolare. Dall'analisi di più di 1000 campioni di suolo si è concluso, come riportato su «Science», che il 93 per cento si trova su più di un continente, e il 34 per cento addirittura su tutti. Si tratta di dati sorprendenti che portano a chiedersi come facciano questi funghi del sottosuolo a viaggiare da un continente all'altro, specie trattandosi di simbiotici obbligati, che cioè possono vivere solo associati a una radice ospite.

Paola Bonfante è professoressa di biologia vegetale all'Università di Torino, al Dipartimento di scienze della vita e biologia dei sistemi, fa parte dell'Accademia dei Lincei di Roma e dell'Accademia delle scienze di Torino. Da quarant'anni si interessa allo studio delle relazioni simbiotiche tra piante e organismi del suolo.

Elisa Dell'Aglio è post-doc al Laboratorio di botanica e biologia vegetale dell'Università di Ginevra. Studia i meccanismi di regolazione del metabolismo vegetale e le risposte delle piante allo stress.

Veronica Volpe è post-doc al Dipartimento di scienze della vita e biologia dei sistemi dell'Università di Torino. Studia le interazioni delle piante con l'ambiente circostante.



Ma quando sono studiati a livello di microscala le differenze nella distribuzione dei funghi simbiotici del suolo si fanno più marcate. Un esempio è dato da studi di sequenziamento effettuati di recente dal nostro gruppo di ricerca al Dipartimento di scienze della vita e biologia dei sistemi dell'Università di Torino insieme con il gruppo dell'Istituto per la protezione sostenibile delle piante del Consiglio nazionale delle ricerche di Torino, in cui sono stati confrontati diversi tipi di suolo (vigneti, prati, foreste e pascoli) provenienti dall'area di Berchidda, in Sardegna. Nonostante l'area d'interesse fosse circoscritta e omogenea, su più di 150 specie fungine meno di dieci sono state trovate in tutti i suoli e la loro abbondanza è risultata molto variabile. In accordo con altri studi, è nei suoli coltivati che si è riscontrata la minore biodiversità.

Ulteriori analisi comparative come queste permetteranno di raccogliere dati sulle relazioni simbiotiche sotterranee in ogni regione tenendo conto di molte variabili, come periodo dell'anno e condizioni climatiche. In questo modo si potranno riconoscere i suoli agricoli impoveriti in microbiota e identificare le specie da reintrodurre. Ma per ristabilire le interazioni più vantaggiose per ambiente e agricoltura non basta rispondere alla domanda «chi c'è?»: bisogna anche capire qual è l'impatto della comunità microbica sul metabolismo della pianta e come fanno le piante a distinguere i partner benefici dai patogeni.

Fertilizzanti naturali...

Grazie alla fotosintesi le piante producono un flusso costante di molecole organiche come zuccheri, amminoacidi, vitamine e nucleotidi. Queste molecole sono usate per l'accrescimento o stoccate come riserve, ma una buona parte (5-20 per cento di tutto il carbonio fotosintetizzato e 10-16 per cento dell'azoto vegetale) è rilasciata nella rizosfera sotto forma di essudati radicali. È una

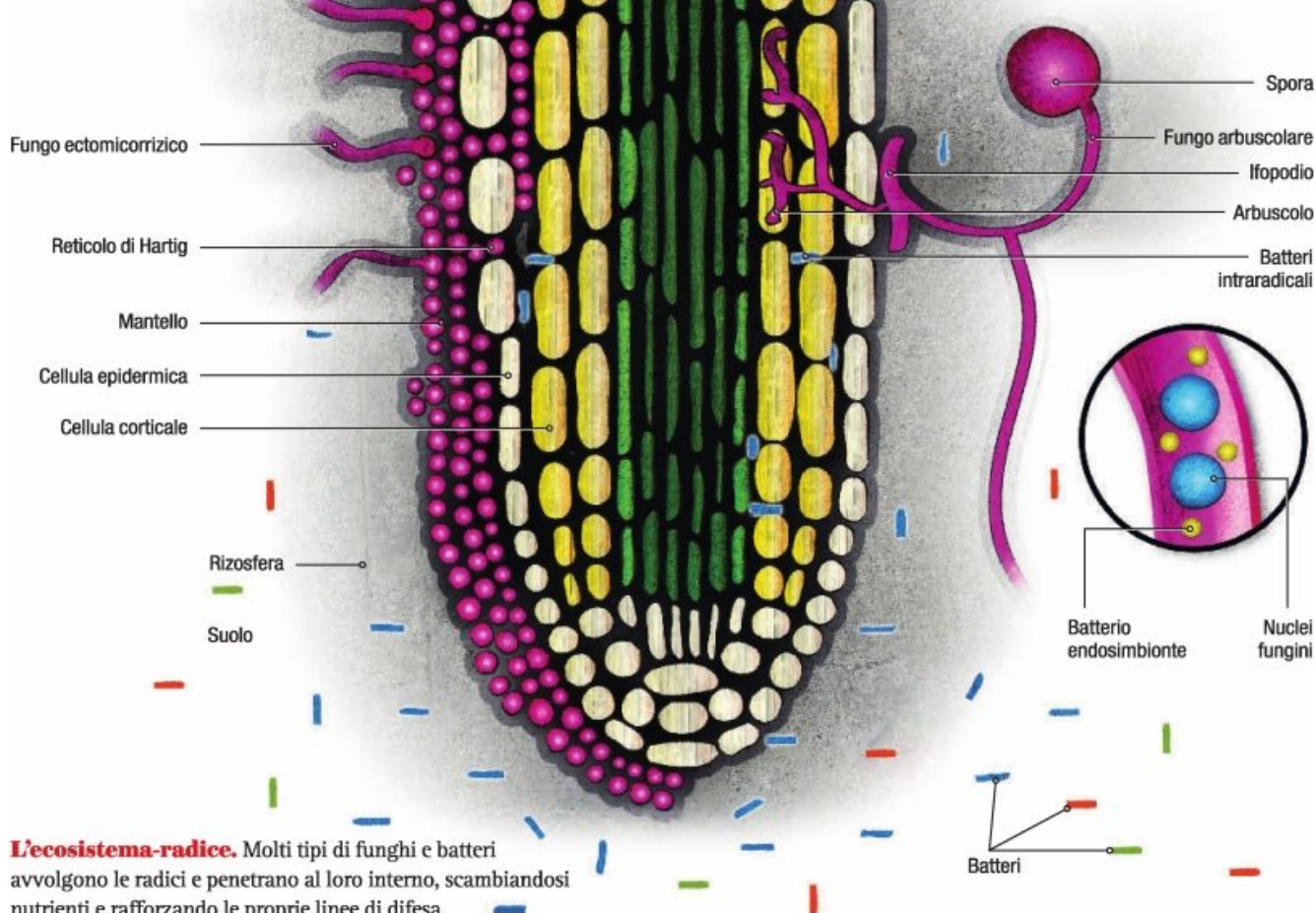
IN BREVE

Le piante non sono organismi isolati, vivono a stretto contatto con vari tipi di microrganismi, in particolare funghi e batteri. Si contano milioni di cellule microbiche per grammo di radice.

La colonizzazione delle terre emerse da parte delle piante fu possibile grazie a funghi simbiotici che permisero alle piante di esplorare il terreno a caccia di minerali, in cambio di zuccheri.

Anche ai giorni nostri le piante non sono isolate, ma formano una rete sotterranea di interazione con funghi simbiotici. La struttura formata da radice e sottili filamenti fungini prende il nome di micorrizza.

I funghi micorrizici, e una loro conoscenza approfondita grazie anche al sequenziamento di genomi, sono importanti per migliorare la resa delle colture limitando l'uso di pesticidi e fertilizzanti.



L'ecosistema-radice. Molti tipi di funghi e batteri avvolgono le radici e penetrano al loro interno, scambiandosi nutrienti e rafforzando le proprie linee di difesa.

manca per gli abitanti del suolo, come dimostrato da esperimenti con l'isotopo carbonio-13, che hanno permesso di seguire il flusso dal carbonio dalla radice ai batteri e funghi della rizosfera.

Viceversa, il principale limite alla crescita vegetale è la nutrizione minerale, ovvero l'assimilazione degli elementi alla base delle molecole organiche come azoto, fosforo e zolfo.

È compito della radice assorbire questi elementi dal suolo, mediante trasportatori localizzati sulle cellule più superficiali dette epidermiche e sulle loro sottili estroflessioni, i peli radicali. In terreni poveri di nutrienti o dove la competizione per le risorse è agguerrita, come nelle foreste o nel sottobosco, l'assorbimento radicale può però non bastare e diventare molto costoso in termini energetici. Inoltre alcuni tipi di composti inorganici, come fosfati di calcio e alluminio, non possono essere assorbiti dalle piante, che quindi possono soffrire di carenza di nutrienti anche in terreni che ne sono potenzialmente ricchi.

È qui che entrano in gioco i funghi micorrizici. Le sottili ife fungine sono più efficienti nell'assorbimento di nutrienti e setacciano una regione di suolo molto più estesa di quella esplorata dalla radice. Una volta assorbiti, i nutrienti sono poi in parte dirottati al simbionte vegetale. Il fosfato, per esempio, scorre lungo le ife fungine fino alla radice sotto forma di granuli di polifosfato. Qui viene rilasciato dal fungo alla pianta ospite che attivamente lo trasferisce grazie a specifici trasportatori.

Non si tratta di una strategia nuova. Stando ad alcuni reperti fossili del Devoniano scoperti nel sito Rhynie Chert, in Scozia, e ad analisi genetiche, oggi sappiamo che le interazioni pianta-fungo risalgono a più di 450 milioni di anni fa, ovvero all'epoca in cui organismi derivati dalle alghe *Charophyta* lasciarono l'ambiente acquatico per la terraferma. Dato che gli antenati di queste prime piante terrestri erano privi di radici, si pensa oggi che all'inizio siano stati proprio i funghi simbiotici a permettere loro di procacciarsi acqua e minerali nel suolo.

In agricoltura l'alleanza con i funghi simbiotici è una valida strategia per migliorare le rese limitando i fertilizzanti nel rispetto della biodiversità del suolo. Dati recenti ottenuti sul pomodoro dal nostro gruppo confermano che una pianta micorrizata cresce più in fretta, produce frutti che maturano prima e si conservano più a lungo, eguagliando piante controllo mantenute su suoli altamente fertilizzati. Inoltre, nei frutti da piante micorrizate, il tenore in minerali, composti aromatici e antiossidanti risulta maggiore rispetto alle piante coltivate in terreni senza funghi simbiotici.

Un simile ruolo di supporto nutrizionale è svolto dai batteri che facilitano l'assorbimento di elementi come ferro e soprattutto azoto. Oltre ai già menzionati rizobi, la conversione in composti dell'azoto atmosferico sembra operata anche da altri tipi di batteri, come *Azoarcus* sp. BH72 o *Klebsiella pneumoniae* 342 che sono stati trovati in radici di cereali come riso e grano. L'alto vantaggio energetico di questa reazione (l'azoto atmosferico è una risorsa virtualmente infinita) può diventare un valido alleato in agricoltura e molti enti, tra cui la Bill & Melinda Gates Foundation, finanziano studi che permettano di sfruttare queste interazioni per migliorare l'apporto di azoto anche a piante non leguminose.

... e guardie del corpo

Il microbiota svolge anche un ruolo protettivo nei confronti di alcuni patogeni. Il caso più clamoroso riguarda i suoli detti soppressivi, in cui le piante sembrano beneficiare di una particolare difesa contro i patogeni dovuta proprio al microbiota (la difesa viene meno, infatti, in seguito a sterilizzazione del suolo).

In parte, la protezione della pianta avviene grazie a composti difensivi prodotti dal microbiota e liberati nel suolo attorno alla radice. Per esempio il 2,4-diacetilfloroglucinolo prodotto da alcuni ceppi di *Pseudomonas* funziona come un repellente per il patogeno del grano *Gaeumannomyces graminis* var. *tritici*.

Sempre più dati indicano però che i simbiotici del suolo so-

Tecniche per lo studio del microbiota

La ricerca di informazioni sulle comunità microbiche del suolo o in altre matrici complesse ha ricevuto un grande slancio dalla biologia molecolare. Negli anni si sono sviluppati molti metodi di identificazione, tra cui l'analisi di polimorfismi, i microarray e il sequenziamento di specifici geni che permettono di identificare le specie, come *16S rRNA* per i batteri e *18S rRNA* per gli eucarioti. Tutti questi approcci hanno però una sensibilità non sempre ottimale, e spesso non forniscono informazioni quantitative.

Da pochi anni le tecniche di sequenziamento

dette di Next Generation Sequencing (NGS) hanno dato un nuovo slancio a questi studi. A differenza del tradizionale *Sanger sequencing* che permette di decifrare un'unica lunga sequenza di DNA per volta, le nuove tecniche sequenziano in parallelo milioni di piccoli frammenti di DNA o RNA (tecnica dell'RNA-Seq). Questi frammenti possono per esempio provenire da un campione di DNA estratto dal suolo. Oltre all'identificazione degli organismi, il risultato del sequenziamento e del riassetto dei frammenti permette di ottenere un «metagenoma» o un «metatrascrit-

toma», ovvero il genoma o il trascrittoma (insieme dei geni espressi, trascritti in RNA messaggero) non di singole specie ma dell'intera comunità microbica.

Le piattaforme di NGS possono sequenziare l'equivalente di più di cinque genomi umani in un'unica corsa, forniscono dati quantitativi e permettono quindi di capire rapidamente chi abita una certa nicchia ecologica e quali geni esprime. I vantaggi e i costi ridotti di queste tecnologie hanno reso lo studio del microbiota una frontiera accessibile a molti laboratori.

no anche in grado di potenziare le difese della pianta stessa. Secondo il modello oggi più accreditato, le difese immunitarie della pianta sono attivate da alcune molecole che i funghi micorrizici e i batteri benefici hanno in comune con i potenziali nemici, come chitina e i peptidoglicani che compongono, rispettivamente, la parete cellulare fungina e batterica. Durante le prime fasi della simbiosi, queste molecole mettono in moto il sistema immunitario radiale fino a quando, mediante meccanismi che coinvolgono ormoni e molecole segnale come i microRNA, piccole molecole non codificanti di RNA, l'intruso è riconosciuto come innocuo e le difese sono repressate.

La pianta resta però in uno stato di allerta noto come *priming* che le permette di reagire più in fretta e con maggiore efficacia a successivi attacchi, a livello radicale ma anche sistemico, per esempio contro funghi patogeni o insetti parassiti delle foglie. Il potenziamento della difesa immunitaria coinvolge cascate di segnalazione orchestrate da molecole come acido salicilico, etilene e acido jasmonico.

Un articolato dialogo sotterraneo

La ridotta e peculiare biodiversità di batteri presenti nella rizosfera e nella radice rispetto al resto del suolo suggerisce che la pianta abbia meccanismi per selezionare la sua clientela. In effetti, recenti scoperte indicano che negli essudati radicali alcune molecole agiscono come repellenti per specie di batteri indesiderati o che attirano quelle benefiche. Tra questi c'è il benzossazolinone DIMBOA, presente negli essudati radicali dei cereali, che funziona come antimicrobico ma attira il batterio benefico *Pseudomonas putida* KT2440. Recenti studi su *Arabidopsis* pubblicati su «Science» da Sarah L. Lebeis dell'Università del Tennessee hanno rivelato che anche l'acido salicilico degli essudati vegetali recluta particolari specie batteriche (come *Flavobacterium* sp. 40 e *Terracoccus* sp. 273) e contribuisce a escluderne altre. In accordo con questa conclusione, le piante mutanti non in grado di produrre o percepire l'acido salicilico presentano un microbiota alterato.

Anche i funghi sono obbligati ad attraversare un check-in prima di accedere alla radice. Il mantenimento dei simbionti arbuscolari, per esempio, determina un costo energetico non indifferente per la pianta. Quindi tenderà a rimanere autonoma e ad allearsi con i funghi arbuscolari solo se necessita del loro aiuto per evitare carenze nutrizionali, in particolare di fosfato. I dettagli della percezione della carenza di fosfato e la conseguente induzio-

CLASSIFICAZIONI

Vari tipi di simbiosi

Ci sono tanti tipi di micorrize, che però sono classificate in due categorie, a seconda se il fungo entra o meno nelle cellule radicali. Nelle ectomicorrize, tipiche di alberi forestali o piante a portamento arboreo, il fungo cresce sulla superficie e tra una cellula e l'altra della radice. I funghi ectomicorrizici appartengono per lo più ai basidiomiceti (boleti, russule, amanite), con esempi di ectomicorrizici ascomiceti, come il tartufo.

Le endomicorrize sono ampiamente diffuse e raggruppano tipologie diverse, unificate dal fungo simbionte nelle cellule epidermiche o corticali. Mentre le micorrize ericoidi sono limitate alle Ericales (dall'Erica alla Calluna) e quelle delle orchidee alla diversificata famiglia delle Orchidaceae, le micorrize arbuscolari sono presenti in quasi tutte le piante terrestri: dai gruppi basali delle briofite fino alle felci, gimnosperme e angiosperme. Le strutture intracellulari dei Glomeromycota, funghi simbionti obbligati che formano la micorriza arbuscolare, hanno un aspetto a piccolo albero che conferisce loro il nome di arbuscoli. Al contrario, le ife dei simbionti delle orchidee e delle eriche non si ramificano, ma si avvolgono su se stesse a formare gomitoli.

ne della simbiosi non sono del tutto chiariti, ma è emerso che la pianta valuta la disponibilità di nutrienti nel suolo a livello degli apici radicali. Nostri studi sulle piante modello *Lotus japonicus* e *Medicago truncatula* hanno rivelato che alcuni trasportatori di fosfato possono intervenire come sensori dello stato nutrizionale del suolo. Insieme a un fattore di trascrizione battezzato MAMI, ovvero una proteina che influisce sull'attività dei geni, questi trasportatori contribuirebbero a orchestrare le risposte della radice alla scarsità di nutrienti, come la ramificazione e la micorrizzazione.

Ma come fanno i due partner a incontrarsi nel buio della rizosfera e dirsi di sì? Negli ultimi anni sono stati fatti molti sforzi per decifrare la comunicazione sotterranea tra piante, funghi e batteri, e si è a poco a poco delineato un vero e proprio «vocabolario molecolare». Se il dialogo tra leguminose e rizobi ha rappresentato la Stele di Rosetta fin dagli anni ottanta, i risultati attuali più significativi riguardano le micorrize arbuscolari.

La percezione della pianta da parte del fungo arbuscolare avviene grazie a composti contenuti negli essudati radicali, tra cui monomeri di cutina, lo strato di natura lipidica che riveste le cel-



L'interazione in una foto. Interazione tra *Rhizophagus irregularis* e una radice di *Lotus japonicus*, dove si vedono le spore fungine (sferette) e le ife che prendono contatto con la radice.

le vegetali e molecole appartenenti al gruppo degli strigolattoni. Quest'ultimi erano noti fin dagli anni sessanta per la loro capacità di stimolare la germinazione di piante parassite, ma nel 2005 su «Nature» è apparso il primo lavoro, per opera di Kohki Akiyama, della Osaka Prefecture University, secondo cui stimolano anche la crescita fungina in direzione della radice. Oggi gli strigolattoni sono considerati molecole di alto valore commerciale, per una doppia ragione: favoriscono gli incontri simbiotici nel suolo e possono essere usati in campo per stimolare la germinazione di piante parassite e facilitarne la rimozione prima della semina.

Le piante percepiscono invece la presenza di funghi arbuscolari con un cocktail di molecole tra cui i lipochitologosaccaridi (MYC-LCO) e i chitologosaccaridi (CO) scoperti, rispettivamente, dall'Università di Tolosa nel 2011 e nel nostro dipartimento nel 2013.

Una volta che ifa e radice sono entrate in diretto contatto seguendo le scie di LCO, CO e strigolattoni, avviene il contatto diretto e la penetrazione del fungo attraverso un ifopodio (una struttura fungina ramificata e rigonfia) che aderisce alla superficie della radice e facilita l'ingresso nelle cellule epidermiche. Ma come è emerso dal sequenziamento del genoma del fungo *Rhizophagus irregularis* pubblicato nel 2013 sui «Proceedings of the National Academy of Sciences», i funghi arbuscolari non contengono alcun gene per la degradazione della parete vegetale, il che suggerisce un ruolo attivo della pianta nel guidare anche questo processo.

In effetti con la microscopia confocale abbiamo osservato che l'ingresso del fungo arbuscolare nella radice è accompagnata da una complessa riprogrammazione delle cellule vegetali: in seguito al contatto del fungo si verificano movimenti del nucleo nelle cellule più superficiali della radice, variazioni dei flussi di calcio e attivazione di intensi processi che portano alla creazione di un'estensione della membrana cellulare che da quel momento avvolge il fungo durante tutta la colonizzazione. Tutte queste risposte sono controllate da una via di segnalazione che coinvolge numerosi geni: l'uso di svariati mutanti mostra che se si bloccano le risposte della radice la colonizzazione fungina si blocca. Dal confronto di genomi di varie alghe verdi e piante terrestri, pubblicato nel 2015 da Pierre-Marc Delaux dell'Università del Wisconsin a Madison e colleghi sui «Proceedings of the National Academy of Sciences», è emerso che molti geni che regolano le risposte molecolari della pianta al fungo erano già presenti nelle alghe antenate delle prime piante terrestri, che erano così «preadattate alla simbiosi».

Una volta superata la barriera del primo strato di cellule epi-

dermiche, il fungo procede spedito nelle cellule della regione detta corticale, dove si ramifica formando i caratteristici arbuscoli. Qui, nella sottile zona di interfaccia tra la parete del fungo e la membrana invaginata della pianta, avvengono gli scambi di nutrienti mediante trasportatori specifici espressi soltanto in queste cellule.

Simbionti di simbionti

I confini della microbiologia del suolo si sono allargati nel 1974, l'anno in cui Paola Bonfante osservò per la prima volta al microscopio elettronico a trasmissione minute macchie scure all'interno delle ife di un fungo arbuscolare dentro una piccola liliacea raccolta nei boschi. Erano batteri non coltivabili, che si sono poi rivelati comuni tra i funghi arbuscolari, ed ereditati di generazione in generazione.

Solo con lo sviluppo della biologia molecolare è stato però possibile dare un nome a questi batteri. Un primo gruppo è identificato come «Mycoplasmata-related-endobacteria», ha una forma coccoide e un piccolissimo genoma privo di molti geni essenziali. Negli ultimi tempi è stato osservato anche dentro funghi molto antichi, come alcuni Mucoromycotina. Un secondo gruppo invece comprende batteri a bastoncello di tipo Gram-negativo, una caratteristica che li distingue da quelli menzionati prima, è presente solo nei funghi riportabili a *Gigaspora* e per questo è stato chiamato *Candidatus Glomeribacter gigasporarum*. Il suo genoma è più cospicuo, ma anche qui tanti geni essenziali mancano, per esempio quelli per la biosintesi di molti amminoacidi, il che dimostra la sua dipendenza dal fungo ospite. Il sequenziamento del suo genoma ha permesso di stimare l'età del batterio e dell'associazione con il fungo, che sembra risalire a milioni di anni fa.

Queste osservazioni hanno aperto un ventaglio di domande: si tratta di semplici parassiti o di simbionti benefici? E nel secondo caso quali vantaggi porterebbero al fungo che li ospita? Le tecniche di sequenziamento hanno permesso di confrontare un ceppo di *Gigaspora margarita* contenente i batteri con un ceppo in cui i batteri erano stati eliminati. Abbiamo osservato che la presenza del batterio aumenta il potenziale bioenergetico del fungo, oltre che incrementare l'attività riproduttiva di *Gigaspora*. Questi nuovi dati sembrano confermare l'ipotesi che, anche in questo caso, due abitanti del suolo molto diversi abbiano imparato a convivere e sostentarsi l'uno con l'altro.

Molti interrogativi restano da sciogliere sull'identità dei microrganismi del suolo e il modo in cui interagiscono, ma nuove tecniche di sequenziamento, editing genetico e osservazione fisiologica ci aiuteranno a trovare nuove risposte in pochi anni. Questi dati sono fondamentali per capire come preservare gli ecosistemi e produrre piante con caratteristiche nutritive di qualità, facendo un uso minore e migliore di fertilizzanti e pesticidi. La chiave, forse, è tutta qui: nelle strategie di collaborazione che le piante hanno imparato a mettere in pratica già 450 milioni di anni fa. ■

PER APPROFONDIRE

Mechanisms Underlying Beneficial Plant-Fungus Interactions in Mycorrhizal Symbiosis. Bonfante P. e Genre A., in «Nature Communications», Vol. 1, 27 luglio 2010.

Arbuscular Mycorrhizal Dialogues: Do You Speak "Plantish" or "Fungish"? Bonfante P. e Genre A., in «Trends in Plant Science», Vol. 20, n. 3, pp. 150-154, marzo 2015.

Structure and Functions of the Bacterial Microbiota of Plants. Bulgarelli D., Schlaeppi K., Schulze-Lefert P. e altri, in «Annual Review of Plant Biology», Vol. 64, pp. 807-838, 30 gennaio 2013.

The Rhizosphere Microbiome and Plant Health. Berendsen R.L., Bakker P.A.H.M. e altri, in «Trends in Plant Science», Vol. 17, n. 8, pp. 478-486, agosto 2012.

ETOLOGIA

I babbuini superano il test

Bravissimi a individuare analogie, capaci di riconoscere la propria ignoranza, meno inclini a riflettere se sono stressati... È il ritratto dei babbuini proposto da un nuovo metodo di ricerca

*di Joel Fagot
e Anaïs Maugard*





IN BREVE

Nel centro di primatologia di Rousset, ad Aix-en-Provence, i babuini possono accedere a loro piacimento ad alcuni test cognitivi collocati vicino al loro recinto.

Ogni scimmia esegue fino a un migliaio di test ogni giorno.

Aumentando via via la difficoltà dei compiti, si scopre che i babuini sono in grado di usare

capacità cognitive elaborate, finora considerate appannaggio esclusivo degli esseri umani.

Le osservazioni dei ricercatori indicano che il contesto sociale influenza il risultato.

Joel Fagot è direttore di ricerca del CNRS. Dirige la piattaforma Cognition et Comportement du Primate presso il centro di primatologia di Rousset, e l'équipe di cognizione comparata dell'Università di Aix-Marseille.



Anais Maugard è ricercatrice all'Università di Aix-Marseille.



I *touch screen* sono arrivati... alle scimmie! Messi liberamente a disposizione dei babbuini ospitati nel centro di primatologia di Rousset, ad Aix-en-Provence, permettono di sottoporre gli animali a un'ampia gamma di test cognitivi. E consentono di fornire nuove prove sperimentali di una continuità tra le facoltà mentali degli esseri umani e quelle dei primati non umani, già evocata nel 1871 da Charles Darwin nella sua opera *La discendenza dell'uomo e la selezione sessuale*.

I primi contatti europei con le scimmie risalgono alle spedizioni cartaginesi del V secolo a.C., ma i primi studi scientifici su questi animali cominciano solo nel XVIII secolo. Naturalisti come George-Louis Leclerc de Buffon ne forniscono poi una precisa descrizione anatomica. E negli anni venti del Novecento gli etologi organizzano alcune spedizioni in Africa e in Asia al fine di comprenderne il comportamento e lo stile di vita, e ne importano alcuni esemplari destinati agli zoo e alle collezioni private.

Successivamente gli studi sulle facoltà cognitive dei primati hanno imboccato due strade: la prima consiste nell'osservazione del comportamento degli animali nel loro ambiente naturale, la seconda nello studio in condizioni di cattività, entro un ambiente controllato. I due metodi hanno prodotto ognuno un patrimonio di scoperte. Le ricerche sul campo hanno rivelato la straordinaria complessità dell'organizzazione sociale delle scimmie: la primatologa britannica Jane Goodall, in particolare, ha osservato che gli scimpanzé della Tanzania vivono in piccoli gruppi guidati da un maschio dominante e si coordinano per cacciare selvaggina

di piccola taglia. In laboratorio, sottoponendo alle scimmie alcuni compiti precisi e ricompensando i loro successi con porzioni di cibo, i ricercatori hanno svelato in questi animali capacità cognitive insospettite. Combinando alcuni simboli di plastica, nel 1972 il ricercatore statunitense David Premack ha insegnato a una femmina di scimpanzé a usare un semplice linguaggio.

Un laboratorio dove le scimmie vivono in gruppo

In cattività, però, gli animali non sfruttano l'intero patrimonio di risorse cognitive che mobilitano nel proprio ambiente naturale. Con la nostra équipe abbiamo perciò elaborato una nuova strategia, a metà fra gli studi di laboratorio e quelli sul campo. Abbiamo installato alcuni strumenti di test accanto a un recinto di babbuini, rendendoli liberamente disponibili agli animali all'interno di appositi scomparti aperti (*si veda la figura in basso*). Ogni scimmia poteva scegliere di allontanarsi temporaneamente dal gruppo sociale per entrare in uno degli scomparti, dove uno schermo

CNRS Photothèque - Fressillon Cyril (a.d.) - Joel Fagot



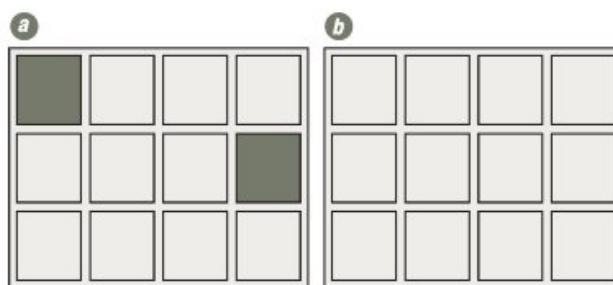
Il babbuino sa di sapere... O di non sapere

Smaragdina. Conoscete il significato di questo termine? No? Quindi vi siete resi conto di una vostra lacuna e, probabilmente, consulterete un dizionario per colmarla. In altre parole siete capaci di metacognizione, ovvero sapete di conoscere o meno la risposta, e quali informazioni vi mancano. Ebbene, anche i babbuini sono dotati di questa facoltà!

Per dimostrarlo abbiamo sottoposto le scimmie a un apprendimento di varie settimane e decine di migliaia di tentativi, nel corso di un esperimento realizzato con Raphaëlle Malassis, del nostro laboratorio, e Gilles Gheusi dell'Istituto Pasteur. Abbiamo presentato agli animali una griglia di 12 quadrati sullo schermo di un computer. Nella prima schermata, che durava soltanto alcuni millisecondi, due quadrati erano verdi e gli altri bianchi (a). Nella seconda schermata tutti i quadrati della matrice diventavano bianchi (b). Per ottenere una ricompensa i babbuini dovevano toccare i due quadrati che nella prima schermata erano verdi.

Gli animali avevano però la possibilità di non rispondere direttamente, e rivedere la parte sinistra o destra della prima schermata toccando rispettiva-

mente la lettera L (per *Left*) o R (per *Right*) nella parte bassa dello schermo. Gli animali hanno cominciato a farlo quando, dopo la fase di apprendimento, si rendevano conto di avere visto male l'una o l'altra parte della prima schermata. Ciò significa che non solo sapevano di ignorare la risposta, ma anche quali informazioni mancavano loro e come trovarle. Di fatto, *smaragdina* è un aggettivo latino che significa «di smeraldo»...



tattile proponeva alcuni test computerizzati e un distributore di ricompense forniva chicchi di grano. Ogni babbuino era dotato di un segnalatore elettronico che permetteva di verificarne l'identità.

Il metodo si ispira al concetto di condizionamento operativo proposto dagli psicologi statunitensi Edward Thorndike, a metà dell'Ottocento, e Burrhus Skinner, a metà del secolo scorso: un animale (o un uomo) tende a riprodurre i comportamenti che gli procurano conseguenze positive. Ricompensando le risposte corrette dell'animale lo induciamo a sottoporsi volontariamente al test, e collocando il dispositivo nel suo ambiente di vita lo stimoliamo a usarlo restando nel suo gruppo sociale: in questo modo riusciamo a studiare l'influenza del gruppo sulle sue capacità cognitive.

Al contrario, di solito nei laboratori, gli animali vivono in luoghi diversi da quelli di sperimentazione, dove vengono trasferiti per eseguire i test. Il ricercatore sceglie l'individuo con cui lavorare e gli impone il proprio ritmo. Nel nostro caso il procedimento è completamente diverso. Noi iniziamo ogni esperimento proponendo i test all'intero gruppo di 24 animali. Alcuni babbuini im-

parano il compito, altri no: non tutti, infatti, hanno la stessa capacità di afferrare i problemi proposti.

Quando abbiamo aperto il laboratorio le scimmie hanno capito rapidamente di poter ottenere ricompense toccando gli schermi. Hanno cominciato a effettuare numerosi passaggi quotidiani nei comparti sperimentali e a poco a poco abbiamo aumentato la complessità dei problemi. Raccogliamo circa 25.000 tentativi al giorno, che corrispondono a una media di circa 1000 partecipazioni quotidiane per ogni animale. È evidente che le scimmie amano i nostri esperimenti. Lavorano in sessioni di qualche minuto, e i computer non alterano i loro comportamenti spontanei, né le loro relazioni sociali.

Di conseguenza abbiamo potuto proporre alle scimmie processi di apprendimento particolarmente complessi, che potevano richiedere anche decine di migliaia di tentativi, e abbiamo scoperto nelle scimmie facoltà cognitive insospettite. Il babbuino, per esempio, è capace di metacognizione (*si veda il box in alto*): sa di sapere o di non sapere.



Alcuni test a libero accesso

sono messi a disposizione di un gruppo di babbuini che vivono in un recinto di 750 metri quadrati e possono entrare a piacimento nei bungalow adiacenti (a). Ciascuno di questi bungalow è dotato di cinque postazioni sperimentali equipaggiate con uno schermo tattile e un distributore di ricompense (b). Un rilevatore elettronico permette di identificare la scimmia che siede davanti allo schermo. L'animale interagisce con il computer (c) e riceve una ricompensa in cibo quando risponde correttamente al test.

Anche le capacità di ragionamento analogico (ovvero la capacità di trovare la soluzione corretta ragionando per analogia con un modello) si sono rivelate molto elaborate nei babuini. Sappiamo ormai da oltre trent'anni che le scimmie sono in grado di riconoscere le relazioni tra gli oggetti. Per esempio nel 1984 Anthony Wright, dell'Università del Texas, ha insegnato ad alcuni macachi ad abbassare una leva in presenza di oggetti diversi, e a non abbassarla in presenza di oggetti identici. Gli animali hanno quindi sviluppato i concetti di uguaglianza e diversità fra oggetti.

Usando il protocollo di test a libero accesso abbiamo dimostrato che il babuino è in grado di stabilire relazioni oggettuali. Numerosi ricercatori avevano finora considerato questa attitudine appannaggio esclusivo dell'uomo, in grado per esempio di paragonare la relazione esistente tra un gatto e un topo a quella fra un uccello e un verme di terra: in entrambi i casi il primo mangia il secondo. Noi abbiamo elaborato un protocollo per studiare questo tipo di ragionamento complesso nei babuini. Mostriamo prima sullo schermo una coppia di forme uguali o differenti (la coppia «modello»), che il babuino deve memorizzare e toccare (si veda la figura in basso a p. 88). Poi presentiamo due nuove coppie, una costituita da due forme identiche e l'altra da due forme differenti. Per ottenere una ricompensa il babuino deve toccare la coppia che esprime la stessa relazione del modello. Dopo la fase di apprendimento (troppo lunga per essere realizzata con un test classico), si mettono alla prova le scimmie con forme nuove, mai viste prima. In queste condizioni alcuni babuini riescono nel compito, rivelando la capacità di stabilire relazioni tra relazioni: se negli esperimenti di Anthony Wright i babuini dovevano confrontare soltanto due oggetti, qui si trovano ad analizzare anzitutto la relazione fra gli oggetti della coppia modello, poi quelle fra gli elementi di ogni coppia del test, e infine devono capire che una di queste relazioni è identica a quella del modello.

Un'altra versione, più difficile, dello stesso compito consiste nel rendere la coppia modello «sbagliata» - quella che la scimmia non deve selezionare - più somigliante al modello di quella giusta. La scimmia può quindi scegliere fra due risposte, una fondata sulla relazione tra gli elementi di ogni coppia e l'altra sul loro aspetto globale. I babuini adottano di preferenza la prima strategia, vale a dire che stabiliscono un legame tra le relazioni.

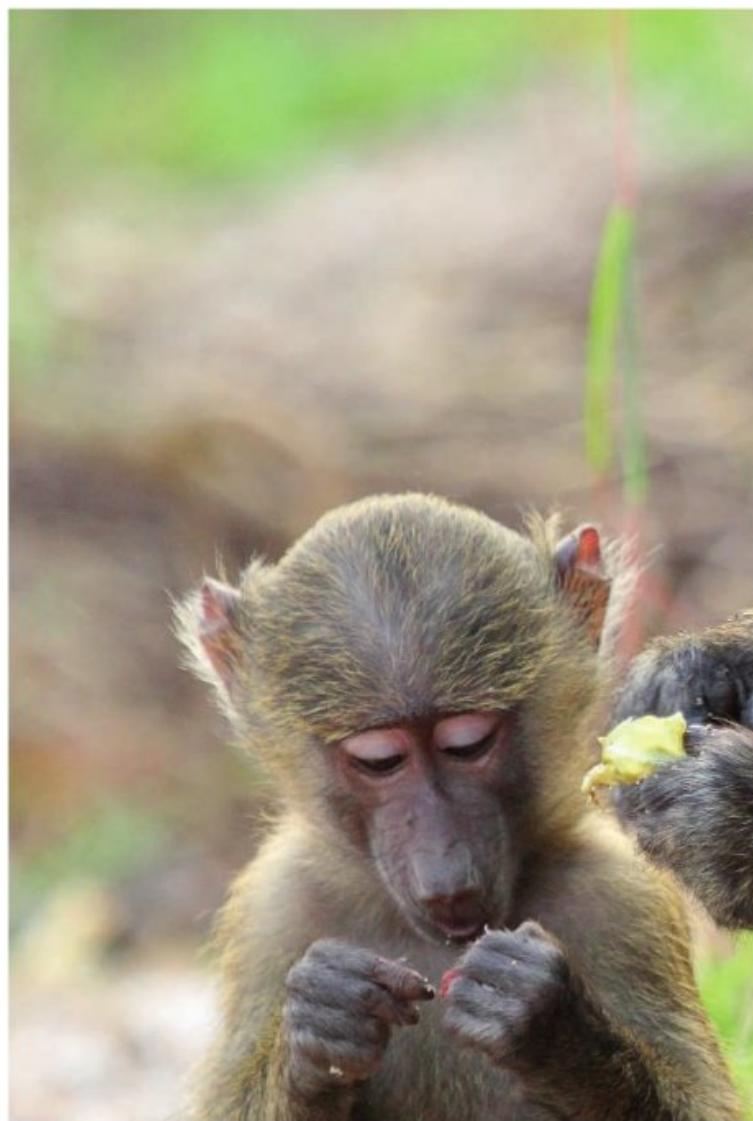
Nel 2007 lo studioso statunitense Dedre Gentner ha somministrato lo stesso test a bambini di età diverse. A partire dai quattro anni e mezzo i bambini sanno associare le relazioni, ma lo fanno solo se vengono nominate le coppie di forme, eventualmente con l'aiuto di parole immaginarie. Lo sperimentatore mostra per esempio la coppia modello dicendo: «Guarda, è un *puffetto*!». Quindi, nel presentare al bambino le due coppie del test gli domanda: «Quale altra, tra queste due, è un *puffetto*?». Quando non si nominano le coppie, vale a dire in condizioni analoghe al test con i babuini, i bambini fra i quattro e gli otto anni abbandonano le strategie relazionali per guardare solo le forme. In questo compito, quindi, i babuini sembrano avere spontaneamente strategie cognitive più complesse rispetto a bambini di terza elementare a cui non si fornisce alcuna indicazione verbale.

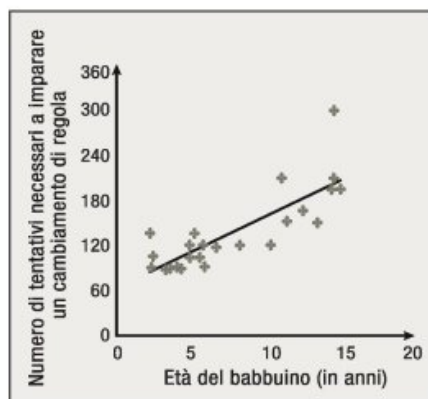
Più dotati di bambini di otto anni?

Tra i 24 individui del gruppo, solo una dozzina ha svolto con successo questo complesso compito di associazione fra relazioni. In generale, spesso constatiamo una grande variabilità di questo aspetto fra gli animali. Da che cosa derivano queste discrepanze? La spiegazione sta forse nella differente efficacia delle funzioni

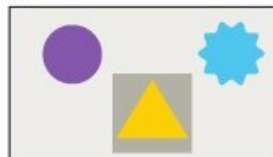
Una fonte di benessere

Per verificare che i test non disturbino i babuini gli autori li hanno addestrati a succhiare bastoncini di cotone, al fine di raccogliere campioni di saliva. Poi hanno misurato la concentrazione del cortisolo salivare, un ormone liberato in caso di stress. La concentrazione era inferiore quando i babuini avevano accesso ai computer. Gli schermi tattili permettono di diversificare le attività, e di attenuare così lo stress migliorando il proprio benessere generale.

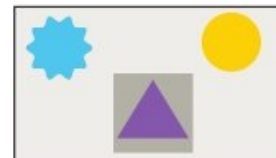
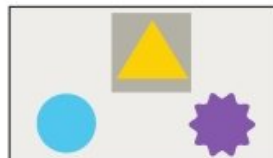




Regola 1: selezionare l'oggetto giallo



Regola 2: selezionare il triangolo



I «vecchi» sono meno flessibili, anche tra le scimmie. In questo test l'animale deve prima toccare l'oggetto di colore giallo (*riga in alto*), poi la regola cambia: l'animale deve selezionare il triangolo (*riga in basso*). Vengono quindi portati altri cambiamenti alle regole e ogni volta si misura il numero di tentativi necessari perché la scimmia inizi a rispondere correttamente. Rispetto ai più anziani, i giovani hanno bisogno di un numero di tentativi molto inferiore per imparare una nuova regola (*grafico*).

esecutive. Queste funzioni cognitive permettono, per esempio, di dirigere volontariamente l'attenzione verso gli elementi pertinenti di un problema, o di decidere un cambio di strategia di fronte a un ostacolo. Nell'uomo è stato dimostrato che le caratteristiche del controllo esecutivo condizionano la capacità di ragionamento. Il maggiore o minore grado di efficacia di questo sistema di controllo nelle scimmie potrebbe spiegare la differenza di prestazioni nei compiti assegnati.

Con i colleghi Elodie Bonté e Timothy Flemming abbiamo messo alla prova questa ipotesi sottoponendo i babbuini ad alcuni test al computer. Abbiamo proposto agli animali un compito detto «del Wisconsin», dove sullo schermo compaiono tre elementi, e l'animale deve toccarne uno in base a una regola determinata (per esempio, «toccare l'elemento giallo, qualunque sia la sua forma»); la scimmia impara la regola per tentativi, ottenendo una ricompensa per ogni risposta giusta. Una volta che l'animale ha capito la regola, la si cambia improvvisamente, trasformandola per esempio in «toccare il triangolo, qualunque sia il suo colore». Le scimmie devono dare prova di flessibilità cognitiva adattandosi rapidamente.

Abbiamo così constatato che i babbuini giovani riescono meglio (*figura in alto*), analogamente a quanto si osserva nell'uomo. Inoltre, l'analisi incrociata dei risultati nel compito di associazione di relazioni e in quello che misura l'efficacia del controllo esecutivo ha confermato che queste caratteristiche sono collegate: le scimmie con una migliore flessibilità cognitiva sono le stesse che riescono meglio nel compito di associazione fra relazioni.

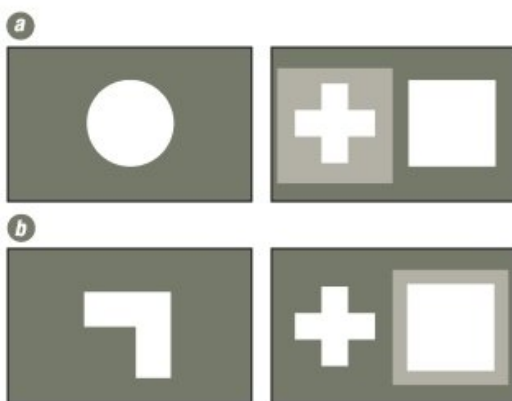
Il nostro dispositivo offre inoltre un'occasione unica di esaminare attraverso una progressione sperimentale l'influenza delle interazioni sociali sulle performance cognitive delle scimmie. In natura, questi animali vivono in gruppi gerarchici composti da alcune decine fino ad alcune centinaia di individui, che hanno interazioni molto ricche. Anche nel centro di primatologia di Rousset i babbuini formano gruppi sociali, da cui non vengono isolati durante lo svolgimento dei test.

L'influenza del gruppo

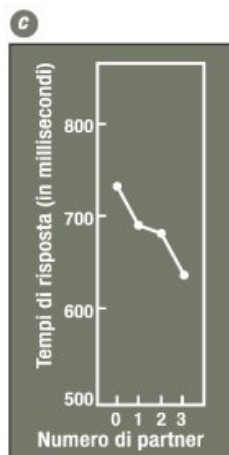
Nel corso della giornata, talvolta, scimmie diverse lavorano insieme in compartimenti adiacenti con le pareti in plexiglas trasparente, dove ogni individuo può vedere i propri compagni all'opera. Altre volte invece è presente solo un babbuino, e gli altri restano nel recinto. Si può dunque misurare l'effetto dei partner sociali sulle prestazioni dei babbuini.

In uno studio condotto insieme a Pascal Huguet, del nostro laboratorio, e Isabelle Barbet dello CNAM (Conservatoire National des Arts et Métiers), abbiamo proposto agli animali un compito





Fanfaroni? Nel test qui sopra, quando la prima schermata rappresenta un cerchio, nella seconda il babbuino deve scegliere la croce (a). Quando viene mostrato per primo un poligono, la scimmia deve toccare il quadrato (b). Dopo alcune migliaia di tentativi, i babbuini aumentano la velocità di svolgimento del compito ogni volta che sono circondati da molti partner (c).



semplice: quando vedevano un cerchio, nella schermata successiva dovevano toccare la forma situata a sinistra dello schermo; se era un poligono, dovevano toccare la forma situata a destra (*figura in basso*). Abbiamo constatato che la velocità di risposta degli animali era legata alla presenza di compagni nelle postazioni di lavoro contigue: questa presenza tendeva ad accelerare la risposta, soprattutto quando il compito era stato imparato bene.

Non solo. Le interazioni sociali influiscono sulle performance cognitive anche in un altro modo, vale a dire modificando lo stato emotivo. Negli animali, come nell'uomo, gli scambi con gli altri hanno il potere di tranquillizzare, stressare, eccitare, rattristare e via dicendo. Nel 2014 abbiamo cercato di verificare se le interazioni spontanee fra i babbuini modificassero i risultati ottenuti in alcuni compiti svolti con il computer (*riquadro nella pagina a fronte*).

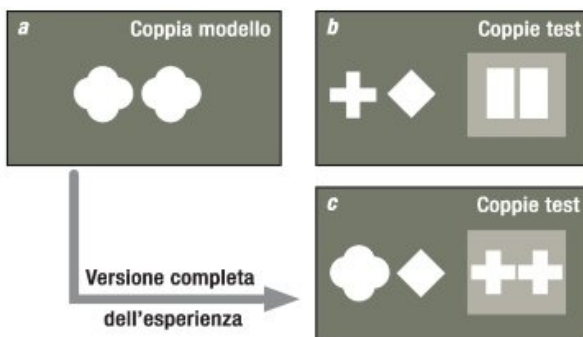
Abbiamo proposto un test in cui gli animali dovevano riconoscere – e toccare sullo schermo – uno stimolo a forma di T nascosto in mezzo ad alcune L con orientamenti diversi. Parallelamente, rilevavamo l'insieme dei comportamenti sociali che si manifestavano nel recinto.

Le prestazioni sono risultate modificate dagli avvenimenti accaduti alcuni minuti prima dell'esecuzione del compito. Le scimmie erano più rapide a riconoscere la forma sullo schermo dopo un'interazione sociale positiva, e più lente dopo uno scambio burrascoso con i compagni. Diversi studi mostrano che anche nell'uomo gli scambi relazionali stressanti hanno un effetto negativo sulle prestazioni cognitive.

I nostri risultati rivelano l'esistenza di un'interazione tra le funzioni cognitive che gestiscono la vita sociale e le funzioni coinvolte nella risoluzione di problemi non sociali. Questa interazione

RICONOSCERE LE RELAZIONI

Ragionamento analogico



Il ragionamento analogico, definibile anche come la facoltà di trovare la risposta giusta per analogia con un modello, non ha segreti per i babbuini. Questi animali, in particolare, sanno riconoscere quando due elementi hanno la stessa relazione all'interno di una coppia «modello» e all'interno di una coppia «test». Qui i due elementi della coppia modello sono identici (a) e i babbuini devono dunque scegliere la coppia di destra sullo schermo (b, *evidenziata*). In una versione più complessa dello stesso esperimento, la «coppia sbagliata» riprende uno dei due elementi della coppia modello e ha dunque un aspetto visivo più simile a questa (c). In questo caso il babbuino sceglie di associare le coppie considerando le relazioni espresse (seleziona sempre la coppia con elementi identici, anche se sono meno somiglianti al modello), mentre i bambini di otto anni non ci riescono spontaneamente.

Più intelligenti dopo una coccola



Avete rischiato un incidente automobilistico, avete avuto un alterco con un collega o vi siete scambiati un gesto di tenerezza con il partner? Le vostre performance cognitive ne avranno risentito.

Con Yousri Marzouki, Annabelle Goujon e Julie Gullstrand, del nostro laboratorio, abbiamo studiato se lo stesso fenomeno sia osservabile nei

babbuini. Un'interazione positiva come lo spulciamento (a), tranquillizza questi animali e ne migliora le prestazioni nei test al computer?

Per capirlo abbiamo catalogato tutte le interazioni sociali spontanee manifestate dalle scimmie nel recinto (b), e le abbiamo messe in relazione con i risultati ottenuti in un test eseguito al computer dove si richiedeva agli animali di ricono-

scere uno stimolo a forma di T in mezzo ad altri elementi distraenti. Le prestazioni sono risultate modificate dallo stato emotivo dell'animale, a seconda degli avvenimenti verificatisi nel recinto qualche minuto prima: dopo un'interazione sociale positiva, le scimmie riconoscevano la forma sullo schermo più rapidamente che dopo uno scambio burrascoso.



finora è stata poco studiata. I primi dati mostrano il grande potenziale del nuovo metodo sperimentale per l'analisi delle influenze sociali sulle funzioni cognitive.

Quando le culture evolvono

Nel 2014 abbiamo esaminato un ulteriore aspetto della vita sociale: la trasmissione culturale. Questo fenomeno, osservato in molti animali, riguarda diversi aspetti della vita quotidiana: dall'uso di utensili all'esecuzione di canti particolari, fino alle strategie per la ricerca del cibo. Ma ogni successivo depositario di questo tipo di conoscenze migliora via via i contenuti che riceve? In passato una simile evoluzione cumulativa era stata constatata solo nell'uomo.

Con lo studioso marsigliese Nicolas Claidière mi sono domandato se anche i babbuini ne siano dotati, e insieme abbiamo perciò ideato un compito da eseguire al computer dove i risultati di un partecipante venivano usati come base di partenza per il partecipante successivo. Nell'uomo il metodo può essere applicato con linguaggi semplificati: il primo partecipante deve apprendere un linguaggio e trasmetterlo al secondo e così via. Con il susseguirsi delle trasmissioni si rileva un perfezionamento dei risultati (i partecipanti memorizzano sempre più fedelmente il linguaggio), una migliore strutturazione (compaiono regole sintattiche) e una «speciazione» (ogni catena di trasmissione approda a un linguaggio specifico).

Nel nostro studio veniva presentata a una scimmia una griglia comprendente quattro quadrati rossi in mezzo a 12 bianchi, e quando tutti i quadrati diventavano bianchi l'animale doveva toccare il punto dove, inizialmente, si trovavano quelli rossi. Se forniva tre o quattro risposte esatte riceveva una ricompensa, e il

motivo dei quattro quadrati che aveva toccato veniva presentato al partecipante successivo.

Abbiamo osservato le tre caratteristiche di un'evoluzione culturale cumulativa: il miglioramento delle prestazioni (nei partecipanti successivi il successo nel compito era sempre più frequente), la strutturazione (i motivi evolvevano, finendo frequentemente per essere costituiti da quattro caselle adiacenti) e la speciazione (ogni catena di trasmissione conduceva a un risultato diverso). I babbuini hanno quindi la capacità cognitiva di far evolvere quanto trasmesso.

Le nostre ricerche rivelano l'importanza di arricchire il contesto di vita e di studio dell'animale in laboratorio, in particolare il suo contesto sociale. Anche altri gruppi – in Giappone, in Europa e negli Stati Uniti – si sono ispirati al nostro metodo, e stanno cominciando ad adottarlo. Il nuovo modello di sperimentazione ha molte probabilità di sviluppo, in quanto permette di studiare le facoltà cognitive dell'animale nelle loro molteplici dimensioni proteggendo al contempo il suo benessere. ■

PER APPROFONDIRE

Baboons' response speed is biased by their moods. Marzouki Y. e altri, in «PLoS ONE», Vol. 9, n. 7, 2014.

Cultural evolution of systematically structured behaviour in a non-human primate. Claidière N. e altri, in «Proceedings of the Royal Society B», Vol. 281, 2014.

Effects of freely accessible computerized test systems on the spontaneous behaviors and stress level of Guinea baboons (*Papio papio*). Fagot J. e altri, in «American Journal of Primatology», Vol. 76, 2013.

Une nouvelle procédure d'expérimentation comportementale à l'interface entre les approches «Naturalistes» et «Généralistes» de la cognition du primate. Fagot J., in «Revue de primatologie», Vol. 2, 2010.

Olimpiadi condominiali

Mancava ancora una rampa di scale, eppure il ripetuto graffiare sulla porta d'ingresso si sentiva già benissimo. Gaetanagnesi odiava restare da sola in casa: anche se solo per poco tempo, anche se i suoi tre coinquilini umani erano distanti dall'appartamento comune solo una decina di metri, tutti misurabili sull'asse delle zeta.

Piotr si ferma, tira il fiato prima dell'ultima decina di scalini, e mugugna senza neppure guardare in faccia Alice e Rudy: «La sentite? Avremo la porta d'ingresso nuovamente istoriata... non dite che non vi avevo avvertito.»

«E con questo? – ringhia Alice in risposta – La micia non la chiudo in bagno se non per cause di stretta emergenza, e una riunione di condominio non lo è di sicuro. E siete stati voi a insistere perché venissi anch'io giù nell'androne per questa stupida riunione, se fosse stato per me...»

«D'accordo, siamo tutti nervosi e scontenti, però evitiamo di litigare per ragioni che non hanno niente a che vedere con il nostro malumore», interviene Rudy in modo diplomatico. «Doc, non ricordo che la nostra porta d'ingresso sia mai stata priva di graffi, quindi non vedo che cosa ci sia da lamentarsi; Treccia, sai bene perché dovevi venire anche tu: fossimo andati solo noi maschietti, riportando a casa il risultato che abbiamo riportato in tre, ci avresti urlato dietro per tre ore e tolto la parola per tre mesi. In questo modo il disastro non cambia, ma almeno è perfettamente condiviso.»

In effetti, il clima non è particolarmente allegro; una vera antitesi del Carnevale, nonostante le fusa gioiose che la micia riserva a tutti non appena rientrano in casa. In monotona fila indiana, i nostri raggiungono poltrone e divani e vi si lasciano cadere sopra. Visto che il silenzio persiste al punto che le fusa feline restano udibili a tutti, Rudy si prende l'incarico di inquadrare la situazione da un punto di vista meno tragico.

«D'accordo, ci siamo cascati di nuovo. Anche quest'anno ci hanno rifilato la progettazione dei famigerati giochi condominiali: due anni fa hanno imbambolato Doc, l'anno scorso sono riusciti a prenderci all'amo nonostante la mia augusta presenza, e stavolta, pur presenziando a ranghi completi, non siamo lo stesso riusciti a evitare la patata bollente. Comincio a sospettare che l'amministratore del condominio sia molto più furbo di quello che lascia credere a prima vista...»

Alice, rincuorata dalla constatazione di essere l'oggetto più amato dalla gatta dopo la ciotola, riprende il piglio combattivo: «Giusto, e questo significa anche che il perfido amministratore è soddisfatto di come li abbiamo organizzati in passato. Pertanto, da pragmatica del gruppo, propongo la soluzione più ovvia: programmiamo gare come la "risoluzione di equazioni sulla corda in fiamme", o l'"attraversamento dell'incrocio a occhi bendati"; scommetto che l'anno prossimo saranno meno predisposti a ridarci l'incarico.»

«Ma dici davvero?», pigola l'ingenua voce di Doc. «...e io che stavo già provando a schizzare una specie di logo per i giochi...



pensavo a cinque cerchi intrecciati, uno per ogni condominio in gioco, magari con i colori caratteristici dei...»

«Piotr, prendi il *tablet*, scrivi "Pierre de Coubertin" sulla barra di Wikipedia, e fatti in fretta una cultura, prima che io perda definitivamente la pazienza. Anzi no, continua: facciamolo davvero, e continuiamo con lo scimmiettare la simbologia olimpica, che questo è pure l'anno giusto: la fiaccola, per esempio, che potrebbe girare per tutti gli appartamenti, preferibilmente incendiando le tendine delle cure vicine; e poi il braciere, diamine!, con la fiamma sempre accesa per tutta la durata dei giochi, alimentata dalla carne viva del maledetto amministratore.»

«Treccia, questo temo sia reato. Secondo una giurisprudenza che molti giudicano eccessivamente permissiva, pare che anche gli amministratori di condominio debbano essere considerati es-



Anche quest'anno ad Alice, Piotr e Rudy è stata rifilata la progettazione dei famigerati giochi condominiali

IL PROBLEMA DI GENNAIO

Nel numero precedente cinque fornitori dai nomi in codice di Birra, Crocchetta, Dolce, Libro e Tabacco venivano erroneamente pagati da Rudy invertendo centesimi ed euro. Indicando con la maiuscola corrispondente al nome del fornitore il numero degli euro dovuti, e similmente con la minuscola il numero dei centesimi (per esempio, espresso in centesimi: Birra doveva ricevere 100B+b cent e invece ne ha ricevuti 100b+B) le condizioni esposte nel problema sono riassumibili nel seguente sistema di cinque equazioni:

$$\begin{aligned} 100b + B - 5 &= 2 \times (100B + b) \\ 100c + C - 5 &= (100C + c)/2 \\ 100d + D - 11 &= 2 \times (100D + d) \\ 100l + L - 11 &= (100L + l)/2 \\ 100t + T - 75 &= 100k \end{aligned}$$

Dove il k della quinta equazione indica un numero intero.

Le prime quattro equazioni del sistema possono risolversi facendo attenzione al fatto che alcuni elementi che compaiono nello svolgimento devono essere multipli di 98 (come $3B+5$ e

$3c-10$) e si può pertanto usare un po' di aritmetica modulare. In questo modo si riesce a trovare che i conti assommavano a 31,63 euro per Birra, 73,36 per Crocchetta, 29,59 per Dolce e 81,40 per Libro.

Il totale effettivamente ricevuto da questi fornitori è 200,14, mentre doveva essere di 215,98: la differenza è finita nelle tasche di Tabacco, cosa che, unitamente alla condizione della cifra tonda rimastagli, consente di stabilire che il suo conto originale era di 75,91 euro.



seri umani, e quindi dar loro fuoco non è permesso. Ciò detto, io giocherei sul fatto che queste gare abbiamo solo accettato di progettarle, non di organizzarle; questo comporta che potremo limitarci a dare linee guida, mentre i nobili compiti della logistica e della realizzazione pratica saranno trionfalmente gestiti dal nostro adorato amministratore.»

Fugaci occhiate speranzose corrono da una poltrona all'altra.

«Dici davvero? L'anno scorso l'unica cosa che quel lemure ha organizzato sono state le mangiate intercalari tra una sessione di giochi e l'altra; devo ancora ritornare al mio peso forma ante competizioni...», ringhia Alice.

«Problema che può affliggere solo chi un peso forma ce l'ha», commenta tristemente Piotr.

«Piantatela. Alla fin fine, l'unica cosa che ci riguarda è il calen-

dario delle gare, e siccome non esistono turni eliminatori perché le gare sono tante ma gli atleti sono pochini, non sarà difficile distribuire le... quante gare hanno detto che si faranno?»

«Boh...» articolano in sincronia le bocche di Doc e Alice.

«Siete collaboratori sempre affidabili, eh... va bene, amen, chiamiamo con un generico M il numero delle medaglie da assegnare. E quanti giorni devono durare, 'sti giochi?»

«Boh...», il monosillabo pseudo-emiliano torna a vagare per l'aire, duplicemente emesso.

«No comment. E sia, allora: detto N il numero di giorni destinati ai giochi, per colpire l'immaginazione e guadagnarsi la stima dell'amministratore sarà sufficiente inventarsi una regola di pianificazione abbastanza stramba da sembrare profonda: che ne dite di pianificare le competizioni in modo che il primo giorno venga assegnata una medaglia più un settimo delle medaglie restanti, il secondo giorno, due medaglie più un settimo delle medaglie restanti, e avanti così, sino all' N -esimo giorno, nel quale vengono assegnate le ultime N medaglie?»

«Bello. Un puro nonsense che avrà di certo successo; ma mi sento un po' confusa, Capo...», commenta Alice. «Se non sappiamo quanto vale N , come possiamo noi... ah! Parti forse dal principio che l'amministratore sappia già quanto vale N ?»

«No, parto dal presupposto che chiunque abbia un quoziente intellettuale superiore a quello di un lichene possa calcolarselo da solo, il valore di N . Perfino l'amministratore.»

«Fantastico! – fa Piotr – Questo allora significa che non avrà la scusa per farsi accompagnare: l'anno scorso, facendo finta di non sapere quante medaglie doveva distribuire, ha preteso che lo accompagnassi...»

«Bene così, allora. E poi, Doc, a dirla tutta sono sempre più convinto che le "medaglie" non siano altro che i bottoni dei cappotti caduti nell'androne tra una sessione dei giochi e l'altra...»

«Probabile. Certa gente è capace di quasi tutto...»

«Perché dici "quasi", Doc?»

«Semplice, Treccia: secondo me, il lichene non riuscirà mai a calcolare quanto dureranno i giochi. Intravedo la possibilità di una consulenza, che potrei farmi pagare lautamente in birra e (forse) dividerla con un paio di coinquilini...»

L'immunità che ci rende unici

Il gene compatibile

di Daniel M. Davis

Bollati Boringhieri, Torino, 2016, pp. 324 (euro 23,00)

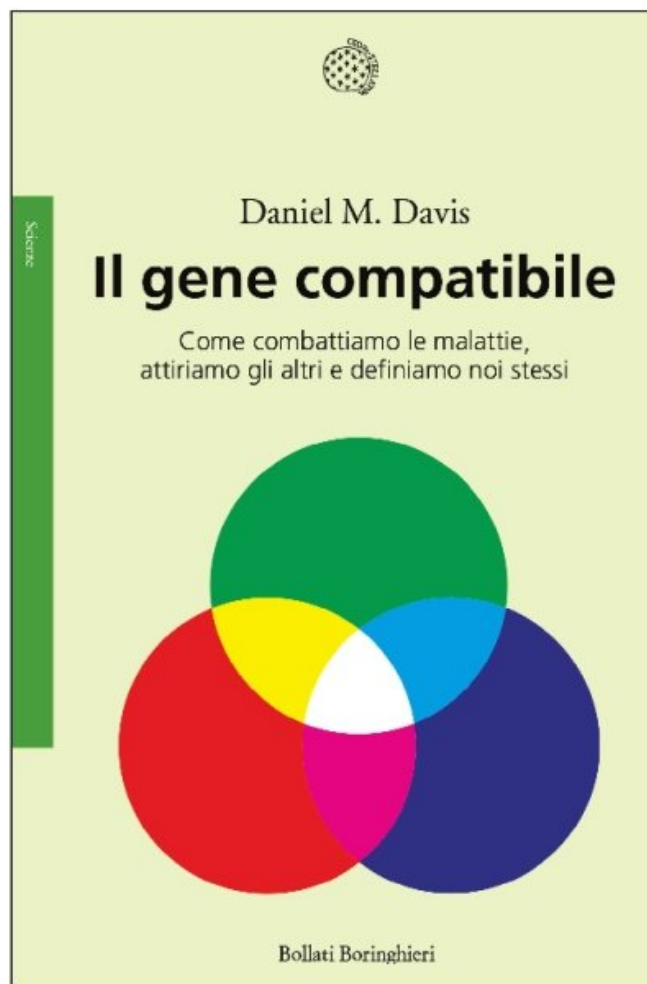
In una calda domenica estiva del 1940 un bombardiere britannico si schianta vicino a una casa di Oxford. Il pilota si ustiona gravemente. Sarebbe un incidente come tanti, se lì non visse il venticinquenne Peter Medawar, ricercatore infaticabile che con la moglie aveva già raggiunto un accordo chiaro: «Hai pieno diritto sul mio amore ma non sul mio tempo».

Medawar visita il pilota in ospedale e, impressionato, inizia a interrogarsi sul perché i trapianti di pelle praticati per curare le ustioni spesso falliscano: se la cute trapiantata proviene da un'altra persona, in breve inizia a deperire e viene distrutta. Se però proviene da parti sane del paziente stesso, la riuscita è molto migliore. Da quell'evento Medawar riceve «una specie di scossa» che lo induce a «lavorare come un pazzo» alle ricerche che lo condurranno, con altri pionieri, a chiarire le basi dell'immunità.

Come mai il corpo distingue i propri tessuti da quelli estranei? E meglio ancora, come può riconoscere ciascun agente estraneo mai visto prima e produrre una molecola specifica nei suoi confronti? I decenni di studi in cui Medawar e tanti altri ricercatori hanno risolto questo enigma e sviscerato i meccanismi fondamentali dell'immunità occupano la prima parte del libro, in libreria dall'11 febbraio. Qui Davis illustra con chiarezza come l'immunità sia uno degli aspetti che più ci rende davvero unici come individui, con radici evolutive antichissime (anche se il libro non approfondisce gli aspetti non umani), e spiega come questa capacità di distinguere il self dal non self si sviluppi nel feto grazie ai geni della compatibilità (il sistema MHC, chiamato HLA nell'uomo), le cui proteine etichettano ogni cellula con una combinazione diversa per quasi ogni individuo.

Ma un libro che voglia appassionare il pubblico generale a cui è rivolto non può limitarsi alle nozioni consolidate, afferma Davis: deve affrontare le frontiere della conoscenza e non nascondere incertezze, sfumature e sfide aperte. A questo sono dedicate le altre due parti.

Davis, immunologo e direttore di ricerca al Manchester Collaborative Centre for Inflammation Research, esplora dunque storia e frontiere della disciplina, forte sia della conoscenza diretta della materia, della sua storia e dei suoi attori, sia di varie interviste e chiacchierate con colleghi. Il racconto scientifico è così vivacizzato dagli aneddoti sulle vite dei protagonisti, fino ad accenni alle tendenze sadomaso dell'uno o alle lettere scritte ogni settimana alla moglie morta da un altro. E non nasconde aspetti controversi e talvolta poco edificanti, ma che illuminano il reale funzionamento dell'impresa scientifica: dall'inevitabile arbitrarietà dei Nobel in un'impresa di una simile portata e con tanti protagonisti (come hanno riconosciuto gli stessi vincitori), fino a un esperimento pubblicato e poi rivelatosi in tutta evidenza sbagliato, ma mai ritirato ufficialmente, così che la cosa è risaputa fra gli addetti ai lavori ma non all'esterno.



Il racconto prosegue quindi con gli sviluppi più recenti e ancora in corso della ricerca sulla compatibilità, illustrando per esempio come gli stessi geni contribuiscano a renderci più o meno reattivi alle infezioni o ai vaccini, e conoscere meglio questi meccanismi dovrebbe aiutarci a ricavare terapie più mirate ed efficaci. O come, in una funzione di certo non prevista per loro, i geni HLA ci aiutino a ricostruire la storia delle popolazioni umane.

La parte finale esplora aspetti che vanno oltre l'immunità, dai nessi fra sistema immunitario e cervello al ruolo che ha la compatibilità HLA fra i due genitori nel successo di una gravidanza, o al suo influsso nella scelta del partner. I geni della compatibilità contribuiscono all'attrazione sessuale mediata dagli odori in topi e ratti, probabilmente come meccanismo per evitare incroci tra consanguinei, ed è ipotizzabile che facciano lo stesso anche nell'essere umano. Ma gli esperimenti in cui una donna giudica l'attrattiva di un potenziale partner annusandone l'odore lasciato su una maglietta non hanno chiarito se l'effetto esista davvero, e se, o in quali condizioni, l'eventuale preferenza vada a un partner simile a noi o a uno molto diverso.

Giovanni Sabato

Viaggio nel tempo, la parola alla scienza



Come viaggeremo nel tempo

di Allen Everett e Thomas Roman

Il Saggiatore, Milano, 2016, pp. 320 (euro 19,00)

Può essere la DeLorean di *Ritorno al Futuro* che, raggiunte le 88 miglia orarie, ci conduce alla data che vogliamo. O una cabina telefonica inglese degli anni sessanta, come il TARDIS del Doctor Who. Quello che conta è che viaggiare nel tempo è uno dei grandi motori della fantascienza e non solo, fin da quando nel 1895 H.G. Wells pubblicò *La macchina del tempo*: romanzo visionario in cui i personaggi discutevano di paradossi e problematiche dei viaggi nel tempo. Appassionati di *Star Trek* (anche il suo equipaggio ha talvolta viaggiato nel tempo), Allen Everett e Thomas Roman hanno deciso di raccontare il lato scientifico della vicenda. Perché se poter vedere di persona i dinosauri o Carlo Magno ha un fascino per lo storico e per lo scrittore, indagare il limite o le possibilità scientifiche del viaggio nel tempo incuriosisce i fisici. Libro rigoroso, quindi, che si ferma sempre un passo prima della pura speculazione, ma restituisce al lettore lo stato dell'arte in materia. Si passerà, per forza di cose, attraverso la fisica di più di un secolo, incontrando trasformate di Lorentz, teoria della relatività di Einstein con il suo paradosso dei gemelli, studi sui *wormhole* firmati da Kip Thorne (esperto di buchi neri e consulente scientifico di un successo mondiale come *Interstellar* di Christopher Nolan), aggiornamento del paradosso di Fermi formulato da Stephen Hawking («se è possibile viaggiare nel tempo, dove sono i turisti temporali?»). In fondo ottimisti, come fa intendere il titolo, gli autori alzano le mani di fronte a quello che per il momento non possiamo negare: non avere la tecnologia per viaggiare nel tempo non implica necessariamente che non l'avremo in futuro.

Marco Boscolo

Uno sguardo critico per ridurre l'impatto sull'ambiente



Dove vanno a finire i nostri rifiuti?

di Mario Grosso e Maria Chiara Montani

Zanichelli, Bologna, 2015, pp. 156 (euro 11,50)

Come riciclare, gestire e smaltire i rifiuti? Mario Grosso, ingegnere ambientale e professore al Politecnico di Milano, e la divulgatrice scientifica Maria Chiara Montani, rispondono partendo dai consumi e dalle abitudini quotidiane di una famiglia tipo italiana e accompagnando i lettori alla scoperta della filiera dei rifiuti, auspicando una società che possa ridurre all'osso gli scarti. Perché il miglior rifiuto è quello che non si produce, ma di fatto, «tutte le nostre attività quotidiane generano, direttamente o indirettamente, una certa quantità di materiali di scarto che non vogliamo e di cui ci dobbiamo disfare».

I due autori spiegano allora perché sia importante cercare di ricavarne ancora qualcosa, «considerandoli come una sorgente di materie prime da reimpiegare e riutilizzare nei processi produttivi, tentando di muoverci sempre più verso una società circolare, una società del riciclo». E oltre a invitare cittadini, aziende e istituzioni a comportamenti virtuosi, sottolineano il ruolo importante della ricerca, «che potrà suggerire strade nuove per sfruttare l'energia contenuta nei rifiuti o per recuperare materiali preziosi dalle discariche e dai prodotti sempre più tecnologici che entreranno nelle nostre vite». Gli autori ricordano che una gestione corretta dei rifiuti può contribuire a limitare uno dei principali problemi ambientali, quello dei cambiamenti climatici associati all'incremento delle emissioni di gas serra, e spiegano perché le politiche di riduzione dei rifiuti residui e un loro adeguato smaltimento siano importanti anche per salvaguardare la salute. Il libro risulta così una lettura piacevole e interessante per assumere uno sguardo attento e critico e impegnarsi a prevenire l'inquinamento, riducendo l'impatto delle proprie attività sull'ambiente.

Simona Regina

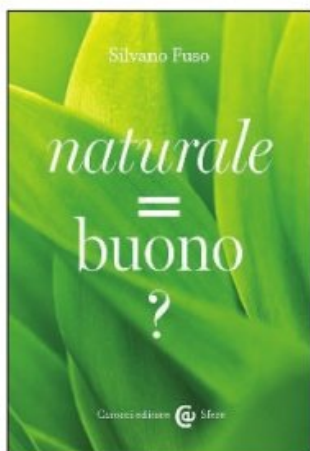
A tu per tu con cinque mostri sacri

Tra i diversi artifici narrativi con cui raccontare la storia della scienza, quello dell'intervista con chi non c'è più è probabilmente il più bizzarro e delicato. Eppure sembra una scommessa vinta quella di Sergio Musazzi, fisico di formazione e attualmente ricercatore per RSE (Ricerca sul Sistema Energetico) di Milano. Il suo *Intervista ai grandi della fisica* (euro 14,00, pp. 176, Il papavero edizioni, Manocalzati, 2015) è un libro scritto in modo chiaro e accessibile su temi che non



sempre è facile illustrare al pubblico meno preparato sui temi scientifici.

Protagonisti delle interviste immaginarie sono Galileo Galilei, Isaac Newton, Albert Einstein, Niels Bohr ed Erwin Schrödinger. Già questo elenco, che segue l'ordine di presentazione dei protagonisti, è da far tremare i polsi. Tuttavia, grazie a un approccio semplice e umile, Musazzi ci guida, anzi ci fa guidare nel grande corso della storia della scienza. Dalla nascita del metodo scientifico alla legge universale della gravità, scalzata in seguito dalla teoria generale della relatività fino alla rivoluzione della meccanica quantistica, l'autore restituisce al lettore concetti e scoperte nel contesto storico in cui sono state ottenute. (cb)



Naturale = buono?

di Silvano Fuso

Carocci Editore, Roma, 2016, pp. 256 (euro 18,00)

Ambiguità e dubbi sul «ritorno al naturale»

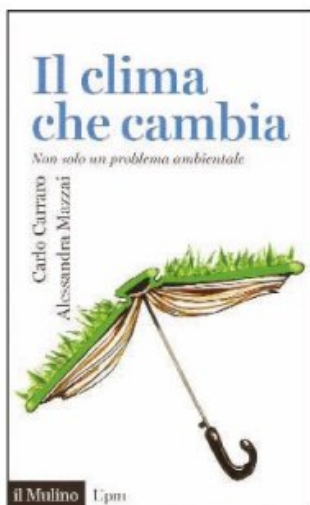
La domanda nel titolo ne porta con sé un'altra: che cosa si intende per «naturale»? La risposta, sostiene l'autore, chimico e noto divulgatore scientifico, non è semplice. La definizione cui siamo abituati, che raccoglie sotto la macrocategoria del naturale quello che non è prodotto dell'azione umana, è incerta e arbitraria, perché *Homo sapiens* è parte di quella natura a cui viene spesso contrapposto. Accettando per comodità questa ripartizione convenzionale, è lecito chiedersi se la moda del ritorno alla natura, che non conosce flessioni, abbia o no basi razionali.

Il fenomeno non è certo recente e ha assunto connotati diversi nel tempo: dalla nostalgica rievocazione di un passato bucolico idealizzato al netto rifiuto di una società che sembra corrompere, fino ai toni anche molto accesi di polemiche che assumono talvolta un colore politico. Il denominatore comune sembra l'eccesso di semplificazione di temi e problemi che svelano tutta la loro complessità a uno sguardo più profondo. Un caso emblematico è rappresentato dal rifiuto degli organismi geneticamente modificati, sostenuto da movimenti ambientalisti, culturali e politici. Sulla scorta dei più interessanti lavori scientifici e divulgativi precedenti, Fuso mostra come le argomentazioni adoperate dai sostenitori della filosofia NO-OGM si-

ano miti privi di fondamento e facili da smontare. Un altro esempio può essere l'agricoltura biologica, i cui prodotti hanno un'immagine decisamente più «naturale», sana e anche etica rispetto a quelli dell'agricoltura tradizionale e per questo raccolgono consensi dei consumatori. Approfondire alcuni aspetti meno noti o poco chiari di questa tecnica agricola potrà essere utile per fare scelte più consapevoli quando ci si muove tra le corsie del supermercato, per capire dove si posiziona il confine tra corretta informazione e tecniche di marketing agroalimentare.

Ma gli argomenti affrontati sono molti: medicina, cosmetici, edilizia, trasporti, radioattività, sessualità e così via. Il concetto di naturalità, applicato a questi ambiti, ha generato diffuse credenze non sempre resistenti al rasolo di Occam. Nell'affrontarle, la scelta dell'autore è non nascondere il proprio parere e, al contempo, di non imporlo al lettore, conservando un tono sempre pacato e distinguendo, in alcuni casi, tra motivazioni etiche, salutistiche e ambientali. Molto interessante anche la riflessione sui problemi della comunicazione della scienza, che giocano un importante ruolo nel diffuso atteggiamento antiscientifico e antitecnologico.

Anna Rita Longo



Il clima che cambia

di Carlo Carraro e Alessandra Mazzai

il Mulino, Bologna, 2015, pp. 200 (euro 14,00)

Gli strumenti per il futuro dopo il cambiamento climatico

Il clima, verrebbe da dire, è più che mai bollente. Solo a dicembre scorso, in una Parigi blindata, si è tenuta la conferenza delle Nazioni Unite nel contesto della Convenzione quadro sul cambiamento climatico. Prima, durante e dopo hanno tenuto banco le polemiche, come quelle che hanno coinvolto alcune società scientifiche italiane, parti politiche, lobby economiche e mezzi di comunicazione. I risultati sono stati «storici» per alcuni osservatori, perché almeno si è riusciti a riconoscere la necessità di un impegno sovranazionale su un tema che non è più possibile, prove scientifiche alla mano, negare. Altri, tra cui una fetta dei ricercatori, hanno ritenuto «deludente» l'impegno preso: si poteva e doveva fare di più per evitare che gli scenari più preoccupanti si possano verificare.

All'interno di una copertura mediatica come poche altre viste per un evento del genere, può essere difficile districarsi in maniera efficace. Per questo, *Il clima che cambia* è un libro utile, perché in poche pagine in formato tasca dipinge la situazione come la conosciamo oggi, fornendo una bussola per orientarsi tra lanci stampa, dichiarazioni di ministri e potenziali derive complottistiche del dibattito. Lo fa nella prima parte, che si occupa più direttamente degli aspetti scientifici, e lo fa spiegando i fenomeni fisici alla base e le loro potenziali conseguenze sul-

la nostra esistenza. Ma è la seconda, quella a cui rimanda il sottotitolo, la parte che mostra la visione più a tutto tondo della situazione. Carlo Carraro, infatti, è professore di economia all'Università Ca' Foscari di Venezia, e affronta il cambiamento climatico globale con la stessa ampiezza di spunti usata per discutere del problema della svalutazione dell'euro o della crisi finanziaria.

Perché se la scienza ci ha messo in guardia, è solo con un'azione politica ed economica che le decisioni di indirizzo prese a Parigi, conservative o meno che siano, possono essere messe in atto. Una delle sfide nella sfida, per esempio, sarà conciliare la necessità di ridurre il consumo di combustibili fossili con 1,3 miliardi di persone che sono ancora in una condizione di «povertà energetica», non dispongono dei mezzi energetici per soddisfare i bisogni primari. La stessa diminuzione delle emissioni di CO₂ passa anche per una regolamentazione dei prezzi delle risorse fossili, uno dei comparti economici più importanti, e quindi anche della politica internazionale. Approvvigionamento energetico, sistemi di produzione e trasporto, modalità di consumo, scelte politiche nazionali e globali: il cambiamento climatico costringe a confrontarsi con l'idea di sviluppo e società che abbiamo in mente.

Marco Boscolo

Una lunga storia alimentare

Una mostra al Museo di antropologia dell'Università di Bologna racconta i cambiamenti nella dieta umana tra Paleolitico e Neolitico



Indizi di cibo.

Denti, ossa ed esempi di arte rupestre, come quelli presentati alla mostra, forniscono informazioni preziose sugli alimenti consumati dai nostri antenati vicini e lontani.



Le ossa, a volte, parlano. E la storia messa in scena nelle sale del Museo di antropologia dell'Università di Bologna è una storia umana lontana nel tempo, ma che ha ancora la forza di parlare di chi siamo noi oggi. Le ossa raccontano i cambiamenti che la dieta umana ha sperimentato in un periodo lunghissimo, tra Paleolitico e Neolitico, quando innovazioni come la costruzione di rudimentali tecnologie litiche e, più tardi, circa 10.000 anni fa l'addomesticamento di piante per uso agricolo hanno profondamente mutato i tipi di cibi consumati. La trasformazione è lenta, ma si passa dal consumo della carne di animali trovati già morti alla caccia e alla raccolta, per comunità nomadi che vengono definite di «cacciatori-raccoglitori», e infine alla stanzialità come conseguenza della nascita dell'agricoltura.

«Ci siamo concentrati su alcuni aspetti dei cambiamenti alimentari nella fase di transizione paleolitico-neolitico attraverso lo studio di alterazione e patologie del cavo orale in diverse popolazioni», racconta Maria Giovanna Belcastro, la responsabile scientifica del museo: «Dai Neanderthal di Krapina, in Croazia (paleolitico medio), fino agli uomini moderni sepolti nella grotta di Taforalt, in Marocco (paleolitico superiore), per arrivare ai neolitici del territorio italiano». Ma ci sono anche, in una sorta di sostan-

ziosa appendice, anche i confronti con la grande messe di dati sul periodo medievale.

Lo scopo di questa operazione? Mostrare in che modo dalle ossa si possano ricavare informazioni per ricostruire le diete del passato e il rapporto di individui e gruppi con l'ambiente circostante. Per esempio, i «Neanderthal non presentano carie, mentre la frequenza incrementa a partire dalla transizione tra paleolitico e neolitico», spiega Belcastro. Non significa, ovviamente, che mangiassero solo carne, ma che i carboidrati non raffinati non erano presenti «in modo sistematico e non in quantità tale da produrre carie». Le ossa, inoltre, mostrano per esempio i segni di avitaminosi e rachitismo, permettendo di tracciare quadri più complessi di quanto non facciano gli ingenui ritorni alla buona dieta del passato.

La natura di onnivoro di *Homo sapiens* è probabilmente uno dei suoi tratti di successo, poiché gli ha permesso di adattarsi ai cambiamenti dietetici quando è stato necessario. «Capire i cambiamenti alimentari, l'evoluzione delle tecnologie con cui l'uomo si è procacciato il cibo, gli interventi attuati per produrre più cibo e più cibo per tutti a partire dal Neolitico, può essere utile per una maggiore consapevolezza di ciò che mangiamo e una maggiore coscienza della nostra attuale qualità di vita».

Marco Boscolo

Dove & quando:

Storia di cibo tra Paleolitico e Neolitico

Fino al 31 maggio 2016
Museo di antropologia
dell'Università di Bologna
Via Francesco Selmi, 3,
Bologna
<http://www.sma.unibo.it/il-sistema-museale/museo-di-antropologia>



Fregati dalla Luna

Una cantonata di cinquant'anni fa ci ricorda i rischi della scienza «a caldo»

Febbraio 1966: dopo una decina di tentativi falliti, l'Unione Sovietica riesce per prima a far atterrare dolcemente una sonda automatica sulla Luna. Per la prima volta nella storia, una telecamera a bordo della sonda trasmette immagini dalla superficie del nostro satellite naturale, rivelandone dettagli mai visti. È una svolta fondamentale nell'esplorazione della Luna.

Ma non sono i russi a diffondere al mondo le immagini: vengono anticipati dai tecnici del radiotelescopio britannico di Jodrell Bank, che intercettano il segnale radio della sonda, si accorgono che le immagini sono trasmesse nel formato standard delle telefono usate dai quotidiani e le decodificano facendosi prestare di corsa un ricevitore apposito dalla redazione del «Daily Express», che le pubblica in prima pagina in esclusiva mondiale, beffando il regime sovietico ossessionato dalla segretezza.

Gli scienziati si buttano con entusiasmo sulle fotografie ravvicinate del suolo lunare, che mostrano una superficie scoscesa, spigolosa e piena di picchi, ma a grana molto fine. La geologia lunare è agli inizi e c'è grande incertezza sulla natura della Luna: antichissimo aggregato di roccia fredda o corpo plasmato dalla fusione interna, con attività magmatica ed eruzioni vulcaniche? Queste prime, straordinarie foto della superficie dovrebbero chiarire la controversia.

L'astronomo Thomas Gold, consulente di punta della NASA, vede nelle immagini rubate alla sonda sovietica la conferma della propria idea della Luna fredda e che i mari lunari siano bacini pieni di polvere finissima accumulatasi progressivamente, in cui un veicolo spaziale sprofonderebbe come nelle sabbie mobili. Il collega Gerard Kuiper (quello della fascia omonima di corpi celesti oltre l'orbita di Nettuno, padre delle scienze planetarie), interpreta le foto in senso contrario: la superficie della Luna, dice, è composta da roccia priva di polvere. Harold Masursky, altro nome celebre dell'astronomia, afferma che le foto mostrano una superficie simile a quella di un flusso di lava pieno di scorie taglienti e che quindi la Luna è chiaramente di origine vulcanica.

Tutte queste dichiarazioni vengono rese a caldo, sotto la spinta dei giornalisti ansiosi di avere parole di esperti per accompagnare le immagini della Luna. Poi arriva la vendetta sovietica: Anatoli Blagonravov, dell'Accademia delle scienze dell'URSS, rivela che i tecnici britannici, nella foga di pubblicare in anteprima le immagini carpite, ne hanno sbagliato clamorosamente le proporzioni, stirandole verticalmente di due volte e mezza rispetto alla realtà ed esagerando quindi ogni minima asperità. Di colpo gli spigoli si smussano, i picchi diventano ondulazioni del terreno e la superficie lunare risulta disseminata di rocce tondeggianti di ogni dimensione, senza pozze di polvere e senza irte colate laviche, ma soprattutto emerge che le deduzioni degli esperti sono basate sull'esame di foto gravemente distorte. L'imbarazzo è genera-



Mezzo scoop. La prima pagina del quotidiano «Daily Express» con una delle foto della superficie lunare rubate ai sovietici.

le: tutti hanno visto quello che volevano vedere. L'unico risultato attendibile è che la superficie è in grado di reggere il peso di un veicolo spaziale, come dimostrato dal fatto che la sonda sovietica non sprofonda nelle ipotetiche sabbie mobili lunari.

A cinquant'anni di distanza le ingenuità di allora fanno sorridere, ma sono un ottimo promemoria del fatto che la pretesa di avere risposte scientifiche istantanee porta facilmente ad abbagli e che anche gli scienziati, in quanto esseri umani, tendono sempre a interpretare i dati come una conferma delle proprie opinioni radicate. Le menti migliori dell'astronomia dell'epoca fecero una figuraccia memorabile sotto la pressione dello scoop spaziale: conviene ricordarselo ogni volta che sentiamo un esperto fornire un parere a caldo in occasione di una nuova scoperta.



di Dario Bressanini

chimico, divulgatore interessato all'esplorazione scientifica del cibo.
Autore di *Pane e Bugie*, *OGM tra leggende e realtà* e *Le bugie nel carrello*.

Costine che si sciolgono

Dalla moda del barbecue al perché cuocere lentamente alcuni tagli di carne

Il *barbecue*, o BBQ, è la moda gastronomica del momento. Importato dagli Stati Uniti, anche in Italia questo modo di cucinare soprattutto la carne ha un notevole incremento di visibilità: si vendono attrezzature, si organizzano corsi e dimostrazioni, si pubblicano libri, e *grillers* famosi spiegano i segreti del BBQ in trasmissioni televisive o in video su YouTube. La sua popolarità si nota anche dal fatto che sempre più spesso dai macellai e nei supermercati si trovano i tipici tagli all'americana di carne da barbecue: per esempio le costine di maiale, o *ribs*, a taglio intero.

Due tipici tagli da BBQ sono le *spare ribs* e le *baby back ribs*. Le prime, più lunghe e con più carne tra le ossa, derivano dalla parte laterale e dalla pancia del maiale, mentre le seconde, più piccole, magre, tenere e con più carne sopra le ossa, arrivano dalla parte superiore dell'animale, vicino al lombo.

Un metodo popolare di cottura delle costine è il cosiddetto «3-2-1»: dopo aver cosperso il taglio intero con aromi, sale e spezie, questo è affumicato nel barbecue per tre ore mantenendo la temperatura a circa 110 °C. Si prende poi il pezzo e lo si chiude sigillandolo in un foglio di alluminio cospargendolo con un po' di liquido a base acida, come aceto o succo di limone, cuocendolo per altre due ore. Per finire si toglie dall'alluminio e si cuoce per un'altra ora a temperature più alte, pennellandolo più volte con una salsa. Sei ore di cottura per le costine possono sembrare tante, però sappiate che ci sono tecniche che richiedono anche più tempo. Chiunque le abbia assaggiate sa che non sono neppure paragonabili alle normali costine da grigliata cotte a fiamma diretta.

La necessità dei tempi lunghi di cottura, a temperature piuttosto basse, deriva dalla struttura della carne. Questa è solitamente composta da tessuto muscolare, tessuto connettivo e grasso. Oltre che da molta acqua ovviamente. Tagli come il filetto sono poveri di grassi e tessuto connettivo, e richiedono cotture veloci ad alta temperatura. Le costine invece sono molto ricche di tessuto connettivo e di grasso. Un muscolo è costruito un po' come un cavo elettrico molto grande costituito da cavi più piccoli. La «guaina» biancastra che ricopre il muscolo è tessuto connettivo chiamato epimisio. All'interno vi sono vari fasci muscolari, piccoli cavi, ognuno ricoperto dalla sua guaina: il perimisio. Ogni fascio è a sua volta suddiviso in fibrille muscolari, ricoperte dall'endomisio.

Tutte queste «guaine» sono formate da una proteina, il collagene, che in alcuni tagli di carne può essere molto resistente, e le costine ne sono ricche. Fortunatamente il collagene può essere sciolto, in presenza d'acqua e a temperature superiori ai 60 °C. Serve tuttavia un bel po' di tempo, per questo il barbecue è perfetto con il suo calore indiretto. Cuocendo a temperature non troppo elevate l'acqua interna alla carne scioglie lentamente il tessuto connettivo trasformandolo in gelatina, e la carne da dura diventa morbidissima, con le fibre che si staccano facilmente.

Se non avete un barbecue potete comunque sfruttare il princi-



Il collagene, la proteina del tessuto connettivo di cui sono ricche le costine, è molto resistente e per scioglierlo servono temperature oltre i 60°C e un bel po' di tempo.

pio anche in un normale forno casalingo, a parte l'affumicatura s'intende. Prendete le costine e cospargetele bene di sale e dei vostri aromi e spezie preferiti. C'è chi usa paprika, pepe, rosmarino, salvia, aglio e così via. Posate le costine sulla teglia. Non è necessario cospargere olio: il grasso presente si liquefa veicolando i sapori che si formano. Cuocete a 130 °C a forno statico per almeno due ore: la carne si deve staccare facilmente dall'osso. A metà cottura potete ribaltare le costine. A questo punto portate il forno a 180 °C e tenetecelo per 15 minuti o fino a quando le costine non saranno ben brunate all'esterno. Non saranno come quelle cotte al barbecue, ma se non avete avuto fretta, la carne quasi si scioglierà in bocca. E ricordatevi che le costine si gustano meglio con le mani.

Il GPS del cervello

di May-Britt Moser e Edward I. Moser

La nostra capacità di pilotare un aereo o di guidare un'automobile – e persino di camminare per le strade di una città – è stata rivoluzionata dall'invenzione del GPS. E prima, come ci orientavamo? Recentemente si è scoperto che il cervello dei mammiferi usa un sistema di localizzazione incredibilmente raffinato per guidarci da un posto a un altro.

Un deposito per i rifiuti radioattivi in Italia

di Davide Maria De Luca e Giovanni Zagni

Tutto è pronto per decidere dove sorgerà il deposito nazionale dei rifiuti nucleari prodotti dalle centrali ormai smantellate e da altre attività, per esempio in ambito ospedaliero. Come sarà strutturato il deposito? E soprattutto, quali saranno i criteri per scegliere la sua collocazione?

L'enzima che rivoluziona la genetica

di Emmanuelle Charpentier e Pierre Kaldy

Il sistema CRISPR-Cas9, un meccanismo che consente ai batteri di combattere i virus, permette di modificare il patrimonio genetico degli organismi viventi con una facilità e una precisione senza precedenti. Le sue ricadute stanno cambiando l'intero settore dell'ingegneria genetica, aprendo anche nuove questioni etiche.



LE SCIENZE S.p.A.

Sede legale: Via Cristoforo Colombo 98,
00147 ROMA.

Redazione: tel. 06 49823181
Via Cristoforo Colombo 90, 00147 Roma
e-mail: redazione@lescienze.it
www.le Scienze.it

Direttore responsabile
Marco Cattaneo

Redazione

Claudia Di Giorgio (caporedattore), Giovanna Salvini
(caposervizio grafico), Cinzia Sgheri,
Ale Sordi (grafico), Giovanni Spataro

Collaborazione redazionale

Folco Claudi, Gianbruno Guerrierio
Segreteria di redazione: Lucia Realacci
Progetto grafico: Giovanna Salvini

Referente per la pubblicità

A. Manzoni & C. S.p.A.
agente Paolo Bardelli (tel. 02 57494338, 335 6454332)
e-mail pbardelli@manzoni.it

Pubblicità:

A. Manzoni & C. S.p.A.
Via Nervesa 21, 20139, Milano, telefono: (02) 574941

Stampa

Puntoweb, Via Variante di Cancelliera, snc,
00040 Ariccia (RM).

Consiglio di amministrazione

Corrado Corradi (presidente), Michael Keith Florek
(vice presidente), Gabriele Acquistapace,
Markus Bossle, Stefano Mignonego

Responsabile del trattamento dati
(D. lgs. 30 giugno 2003 n.196):
Marco Cattaneo

Registrazione del Tribunale di Milano n. 48/70
del 5 febbraio 1970.

Rivista mensile, pubblicata da Le Scienze S.p.A.
Printed in Italy - gennaio 2016

Copyright © 2015 by Le Scienze S.p.A.
ISSN0036-8083

Tutti i diritti sono riservati. Nessuna parte della rivista può essere riprodotta, rielaborata o diffusa senza autorizzazione scritta dell'editore. Si collabora alla rivista solo su invito e non si accettano articoli non richiesti.

SCIENTIFIC AMERICAN

Editor in Chief: Mariette DiChristina; Executive editor:
Fred Guteri; Managing Editor: Ricki L. Rusting; Board
of Editors: Mark Fischetti, Christine Gorman, Anna
Kuchment, Michael Moyer, Gary Stix, Kate Wong,
David Biello, Larry Greenemeier, Ferris Jabr, John
Matson

President Steven Inchcoombe;

Executive vice president: Michael Florek;

Vice president and associate publisher: Michael Voss;
Design Director, Michael Mrak

Hanno collaborato a questo numero

Per le traduzioni: Benedetta Antonielli: *Che cosa uccise i dinosauri? I habbuini superano il test; Mauro Capocci: Genomica per la comunità; Daniele Gewurz: La guerra dei telescopi, Entanglement quantistico e geometria, Dov'è «aquis»; Cristina Serra: Rivelatore di malattie.*

Notizie, manoscritti, fotografie, e altri materiali redazionali inviati spontaneamente al giornale non verranno restituiti.

In conformità alle disposizioni contenute nell'articolo 2 comma 2 del «Codice Deontologico relativo al trattamento dei dati personali nell'esercizio dell'attività giornalistica ai sensi dell'Allegato A del Codice in materia di protezione dei dati personali ex d.lgs. 30 giugno 2003 n.196», Le Scienze S.p.A. rende noto che presso la sede di Via Cristoforo Colombo, 90, 00147, Roma esistono banche dati di uso redazionale. Per completezza, si precisa che l'interessato, ai fini dell'esercizio dei diritti riconosciuti dall'articolo 7 e seguenti del d.lgs.196/03 - tra cui, a mero titolo esemplificativo, il diritto di ottenere la conferma dell'esistenza di dati, la indicazione delle modalità di trattamento, la rettifica o l'integrazione dei dati, la cancellazione ed il diritto di opporsi in tutto od in parte al relativo utilizzo - potrà accedere alle suddette banche dati rivolgendosi al Responsabile del trattamento dei dati contenuti nell'archivio sopradichato presso la Redazione di Le Scienze, Via Cristoforo Colombo, 90, 00147 Roma.

ABBONAMENTI E ARRETRATI SOMEDIA S.p.A.

Casella Postale 10055 - 20111 Milano
Abbonamenti: abbonamentiscienze@somedia.it
Arretrati e prodotti opzionali: lescienzevendite@somedia.it
Tel. 199.78.72.78 (0864.256266 per chi chiama da telefoni cellulari. Il costo massimo della telefonata da rete fissa è di 14,37 cent di euro al minuto più 6,24 cent di euro di scatto alla risposta (iva inclusa). Per chiamate da rete mobile il costo massimo della chiamata è di 48,4 cent di euro al minuto più 15,62 cent di euro di scatto alla risposta (iva inclusa). Fax 02 26681991.
Abbonamenti aziendali e servizio grandi clienti
Tel. 02 83432422; fax 02 70648237;
mail.grandiclienti@somedia.it

Italia

abb. annuale	€ 39,00
abb. biennale	€ 75,00
abb. triennale	€ 99,00
copia arretrata	€ 9,00

Estero

abb. annuale Europa	€ 52,00
abb. annuale Resto del Mondo	€ 79,00



Accertamento
diffusione stampa
certificato
n. 7827 del 9/2/2015

Le Scienze

edizione italiana di Scientific American

DA COLLEZIONARE
E CONSERVARE!

**PER TE SCONTI, VANTAGGI E
PRIVILEGI ESCLUSIVI. ABBONATI!**

Ogni mese Le Scienze ti informa
sulle ultime frontiere della
ricerca scientifica e tecnologica.

E, **solo con l'abbonamento**,
ti assicuri la possibilità
di consultare sul sito
www.lescienze.it gli oltre
4.200 articoli pubblicati
dal 1968 ad oggi!

Se lo desideri, **puoi regalare
l'abbonamento** a chi vuoi tu!



**Fino al
38%
di sconto**

SCEGLI LA TUA OFFERTA!

DURATA	PREZZO di copertina	PREZZO PER TE	RISPARMIO
1 ANNO 12 numeri	€54,00	€39,00	€15,00
2 ANNI 24 numeri	€108,00	€75,00	€33,00
3 ANNI 36 numeri	€162,00	€99,00	€63,00

Offerta valida solo per l'Italia fino al 31/12/2016

ABBONATI O REGALA L'ABBONAMENTO!

● CONVENIENTE!

Più aumenta la durata del tuo abbonamento, più aumenta il risparmio. E il prezzo rimane bloccato!

● FACILE!

✓ Collegati al sito **www.ilmioabbonamento.it**

✓ Chiama il n. **199.78.72.78*** fornendo i dati della tua carta di credito

*0864.25.62.66 per chi chiama da telefoni non abilitati o cellulari. Il costo massimo della telefonata da rete fissa è di 14,48 cent di euro al minuto più 6,29 cent di euro di scatto alla risposta (iva inclusa). Per chiamate da rete mobile il costo massimo della chiamata è di 48,8 cent di euro al minuto più 15,75 cent di euro di scatto alla risposta (iva inclusa).

✓ Compila, stacca e spedisce - anche via fax - la cartolina che trovi nella rivista

BMW Motorrad



Piacere di guidare

bmw-motorrad.it

NOI NON NE ABBIAMO VISTE ABBASTANZA.

**DI TERRE, DI FACCE. DI STRADE E DI PERSONE.
NOI VIAGGIAMO DA TROPPO PER CREDERE
DI AVER SCOPERTO TUTTO. PER QUESTO NOI PARTIREMO
IL 20 E 21 FEBBRAIO. PERCHÉ LÌ FUORI C'È UN MONDO.
E NOI CE LO PRENDEREMO. MAKE LIFE A RIDE.**

Se anche tu ti senti pronto a catturare i migliori angoli del mondo, sabato 20 e domenica 21 febbraio visita una concessionaria BMW Motorrad e partecipa al concorso **#scattataconGS**. Potrai vincere un viaggio-reportage alla scoperta dell'Islanda e vivere la vera "GS Attitude" in un'esperienza straordinaria. Info e regolamento su bmw-motorrad.it

#SCATTATACONGS



this is the
GS
attitude