

Il terremoto che fece cambiare il corso del Po

Marzo 2017

€ 4,50

# Le Scienze

www.lescienze.it

edizione italiana di Scientific American

## Un universo Matrix

E se il cosmo  
in cui viviamo  
fosse composto  
da unità  
fondamentali  
di informazione?

### Evoluzione

Fossili piumati fanno luce sulla transizione evolutiva che dai dinosauri portò agli uccelli

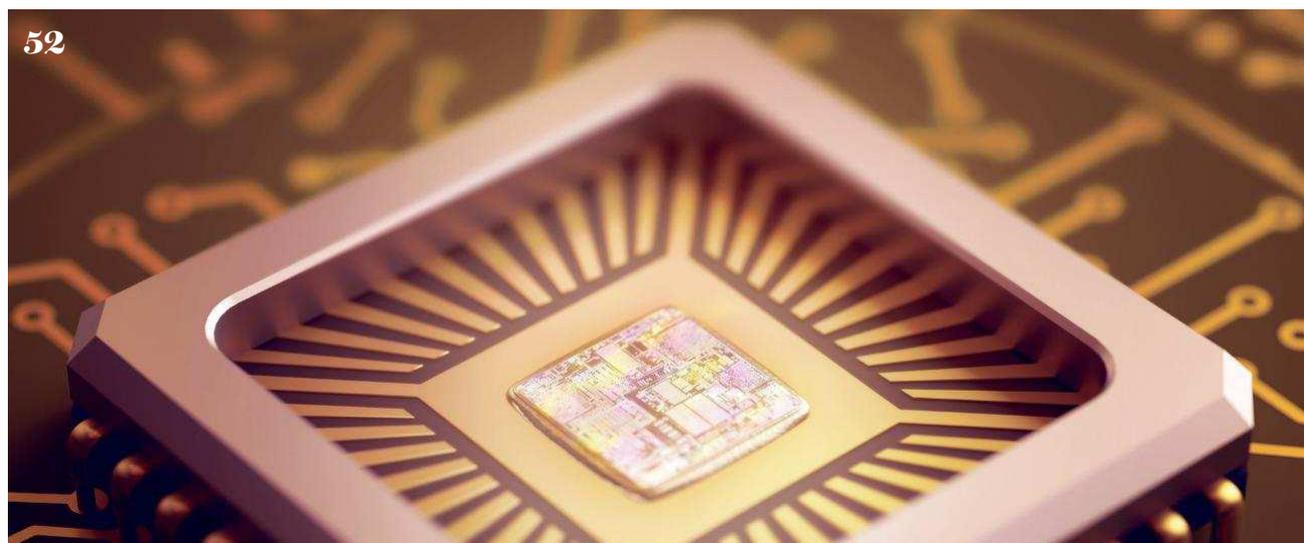
### Neuroscienze

Costruire cervelli in laboratorio per studiare le malattie, dalla schizofrenia all'Alzheimer



Un'ipotesi che punta a unire meccanica quantistica e relatività generale prevede che lo spazio-tempo sia composto da elementi fondamentali di informazione.  
(Illustrazione Kenn Brown, Mondolithic Studios)

marzo 2017 numero 583



52

## FISICA TEORICA

**28 Grovigli nello spazio-tempo**

di Clara Moskowitz

Un progetto che coinvolge centinaia di fisici esamina l'ipotesi che spazio e tempo siano emersi dall'entanglement quantistico di minuscoli frammenti di informazione

## NEUROSCIENZE

**34 Cervelli in laboratorio**

di Juergen A. Knoblich

Gli scienziati riproducono l'organo più complesso della natura per risolvere i misteri di alcuni disturbi cerebrali. Dall'autismo all'Alzheimer

## EVOLUZIONE

**40 Spiegare il volo**

di Stephen Brusatte

Gli eccezionali fossili dei dinosauri precursori degli uccelli rivelano come l'evoluzione produce nuovi tipi di organismi

## INTELLIGENZA ARTIFICIALE

**48 In difesa del robot disobbediente**

di Gordon Briggs e Matthias Scheutz

Non preoccupatevi per una rivolta delle macchine. Le minacce più serie vengono dalla possibilità che i loro padroni umani abbiano cattive intenzioni o dall'eventualità che i robot capiscano male i comandi

## FISICA

**52 Verso computer a zero energia**

di Miquel López-Suárez, Igor Neri e Luca Gammaïtoni

Un esperimento ha dimostrato che è possibile costruire dispositivi di calcolo che operino con una quantità di energia arbitrariamente piccola

## DOMANDE E RISPOSTE

**60 Il guerriero ambientalista**

di Richard Schiffman

Richard Leakey, già paleontologo e oggi uomo politico, guida la lotta del governo del Kenya contro il bracconaggio

## SCIENZE FORENSI

**64 Animali sulla scena del crimine**

di Jason Byrd e Natasha Whitting

I progressi della medicina veterinaria forense contribuiscono a far scoprire e condannare chi maltratta gli animali

## CARDIOLOGIA

**72 Terapia per il cuore**

di Gabor Rubanyi

Riuscire a controllare la capacità intrinseca di guarigione del cuore può aiutare a prevenire l'infarto e anche a ridurre gli effetti dolorosi causati dal marcato restringimento delle arterie coronarie

## GEOLOGIA

**78 Il terremoto che ha deviato il Po**

di Livio Stirovich

Un sisma di quattro secoli e mezzo fa costrinse il fiume più lungo d'Italia a deviare la foce decine di chilometri più a nord e diede vigore a superstizioni religiose

## BIOLOGIA

**84 Neuroscienza degli zombie**

di Christie Wilcox

Gli scienziati hanno capito in che modo il veleno iniettato da una piccola vespa trasforma uno scarafaggio nel suo burattino, e in un perfetto pasto vivente per la sua prole



15



18



89

**Rubriche**

**7 Editoriale**

*di Marco Cattaneo*

**8 Anteprima**

**9 Lavori in corso**

**10 Intervista**

Uscire dal labirinto con i quanti *di di Anna Rita Longo*

**12 Made in Italy**

Mettersi insieme per innovare *di Letizia Gabaglio*

**14 Scienza e filosofia**

Fisica e libertà *di Elena Castellani*

**15 Appunti di laboratorio**

Il gene che fa la differenza *di Edoardo Boncinelli*

**16 Il matematico impertinente**

Le radici della fotografia *di Piergiorgio Odifreddi*

**17 La finestra di Keplero**

Tra materia e antimateria *di Amedeo Balbi*

**18 Homo sapiens**

Una diversità di orecchio *di Giorgio Manzi*

**88 Coordinate**

Lunga vita a Hubble *Katie Peek*

**89 Povera scienza**

Bagliori nel buio *di Paolo Attivissimo*

**90 La ceretta di Occam**

Neri, biondi o bianchi? *di Beatrice Mautino*

**91 Pentole & provette**

Biscotti senza *di Dario Bressanini*

**92 Rudi matematici**

Psicologia cognitiva alla posta  
*di Rodolfo Clerico, Piero Fabbri e Francesca Ortenzio*

**94 Libri & tempo libero**

**SCIENZA NEWS**

- 19 Il batterio con il DNA artificiale
- 20 L'evaporazione di un buco nero
- 20 Nessuna traccia (ancora) di materia oscura
- 21 Ritratto di un cristallo spazio-temporale
- 21 La radiazione luminosa spinge e tira

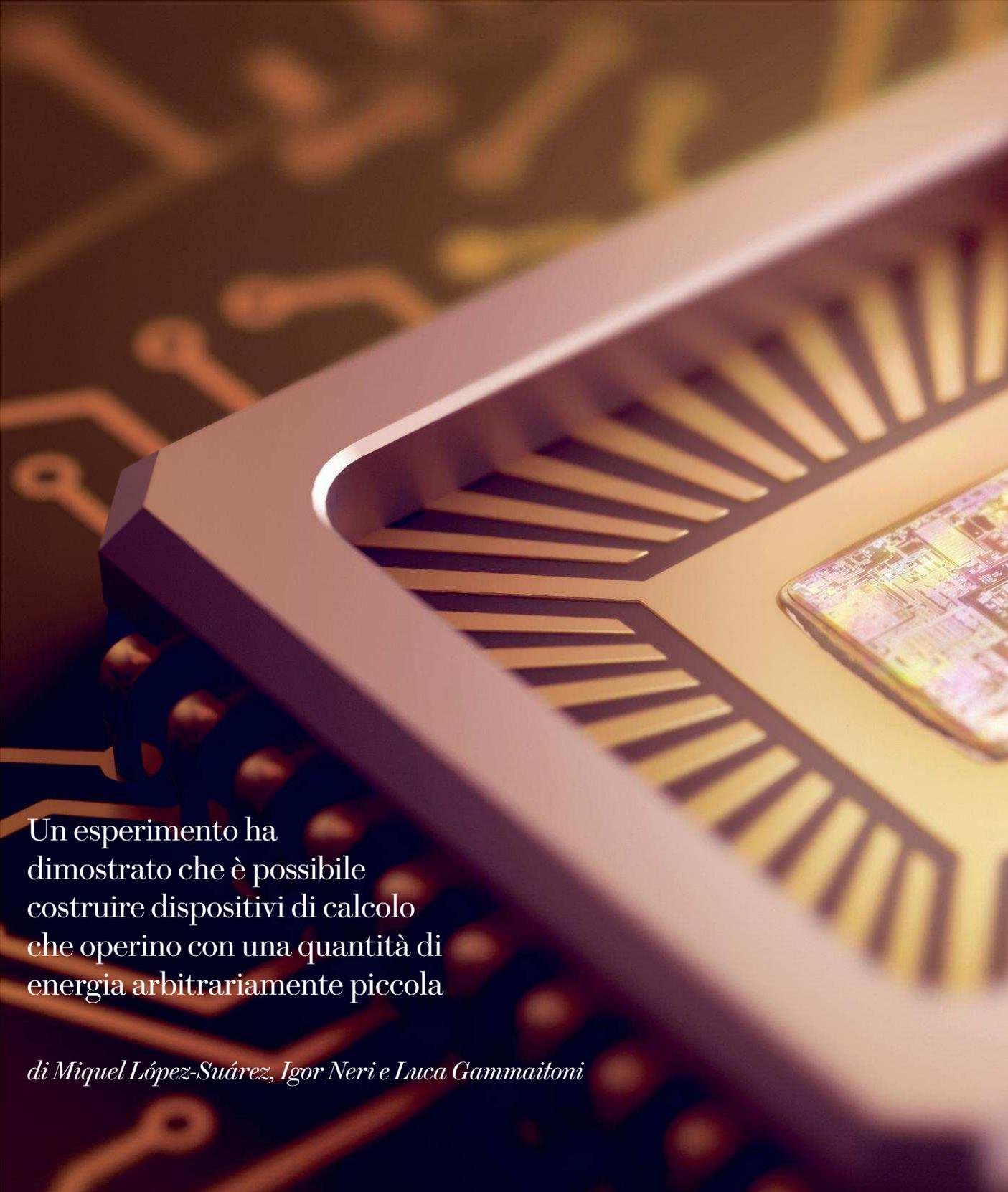
- 22 L'intelligenza artificiale diventa fluida
- 22 Un carta riscrivibile per il futuro
- 23 L'alba dei deuterostomi
- 23 La prima chimera umano-animale, tra limiti e potenzialità

- 24 L'Antartide è veramente così solido?
- 24 Nessun aumento per i gas serra
- 25 Come l' LSD apre le porte della percezione
- 26 Brevissime

Cortesia Jacques Hervé Fiebet/CERN (in basso); Arco Digital Images/AGF (al centro); Thomas Deerinck/NCMIR/Science Photo Library/AGF (in alto)

FISICA

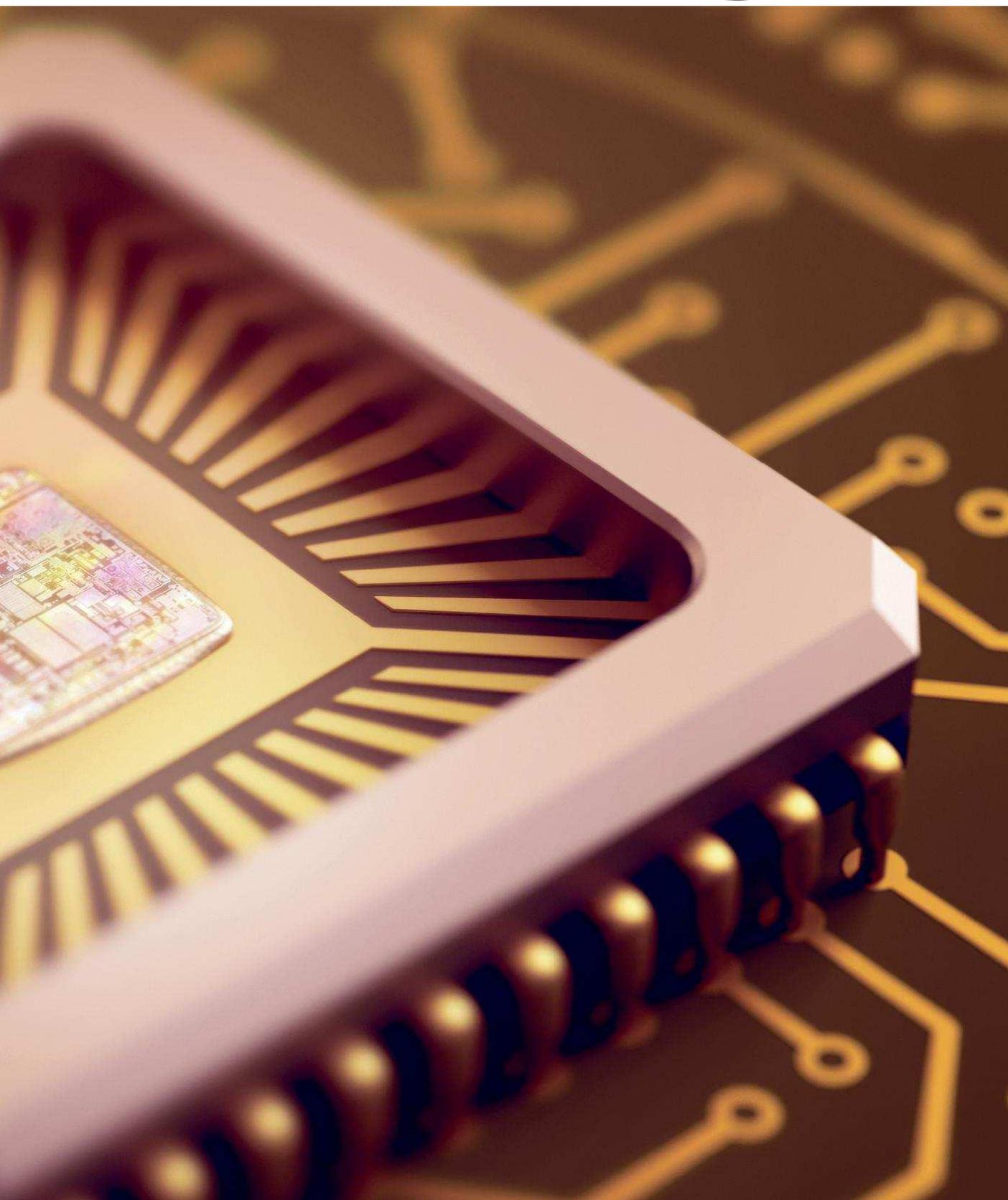
# Verso computer



Un esperimento ha dimostrato che è possibile costruire dispositivi di calcolo che operino con una quantità di energia arbitrariamente piccola

*di Miquel López-Suárez, Igor Neri e Luca Gammaitoni*

# a zero energia



**Miquel López-Suárez** è assegnista di ricerca presso il laboratorio Noise in Physical Systems (NiPS) dell'Università di Perugia.

**Igor Neri** è assegnista di ricerca presso il laboratorio Noise in Physical Systems (NiPS) dell'Università di Perugia.

**Luca Gammaitoni** è attualmente professore ordinario di fisica sperimentale all'Università di Perugia e direttore del laboratorio NiPS.



**A**vete notato che la durata delle batterie dei telefoni cellulari è diminuita negli ultimi anni? Questo fenomeno è andato di pari passo con l'aumento delle funzioni e delle prestazioni di questi dispositivi. Da semplici terminali di telefonia sono diventati veri e propri centri multimediali che coprono funzioni tra loro molto diverse: dalla connessione al Web alla produzione di fotografie e filmati, dall'elaborazione di suoni e immagini al controllo delle nostre condizioni di salute o prestazioni sportive.

Questo spettacolare aumento di prestazioni è stato possibile grazie al crescente sviluppo tecnologico degli ultimi decenni, che ci ha fornito microprocessori sempre più veloci e sempre più complessi. Questi microprocessori costituiscono il cuore di ogni dispositivo elettronico e contengono un grande numero di transistor (attualmente oltre un miliardo per dispositivo), che per poter svolgere le operazioni di calcolo richiedono ciascuno una certa quantità di energia elettrica: attualmente i transistor più efficienti consumano circa  $10^{-15}$  joule per operazione, dove 1 joule è l'energia che serve a sollevare da terra una mela per l'altezza di un metro. Maggiore il numero di transistor, maggiore la capacità di calcolo, maggiore il consumo dei dispositivi. Da qui la riduzione della durata delle batterie che devono fornire questa energia.

Progettisti e costruttori di microprocessori si trovano oggi davanti al difficile compito di aumentare la potenza di calcolo, il che

significa aumentare numero e velocità di funzionamento dei transistor, cercando di non aumentare troppo l'energia consumata. La situazione è grave al punto che in *Rebooting the IT Revolution: A Call to Action*, l'ultimo rapporto presentato da Semiconductor Industry Association (SIA) e Semiconductor Research Corporation (SRC), nel 2015, si paventa che, continuando di questo passo, nel 2040 il consumo di elettricità dovuto all'uso dei computer supererà l'intera produzione mondiale di elettricità.

Negli ultimi quarant'anni sono stati fatti molti tentativi di successo mirati a ridurre il consumo energetico dei transistor, tuttavia sembra che per una serie di problemi sia tecnologici sia economici questa strada non sarà più percorribile a lungo. Per evitare il blocco della crescita nel settore, dovremo presto studiare nuovi modi per costruire computer che siano più efficienti dal punto di vista energetico.

#### IN BREVE

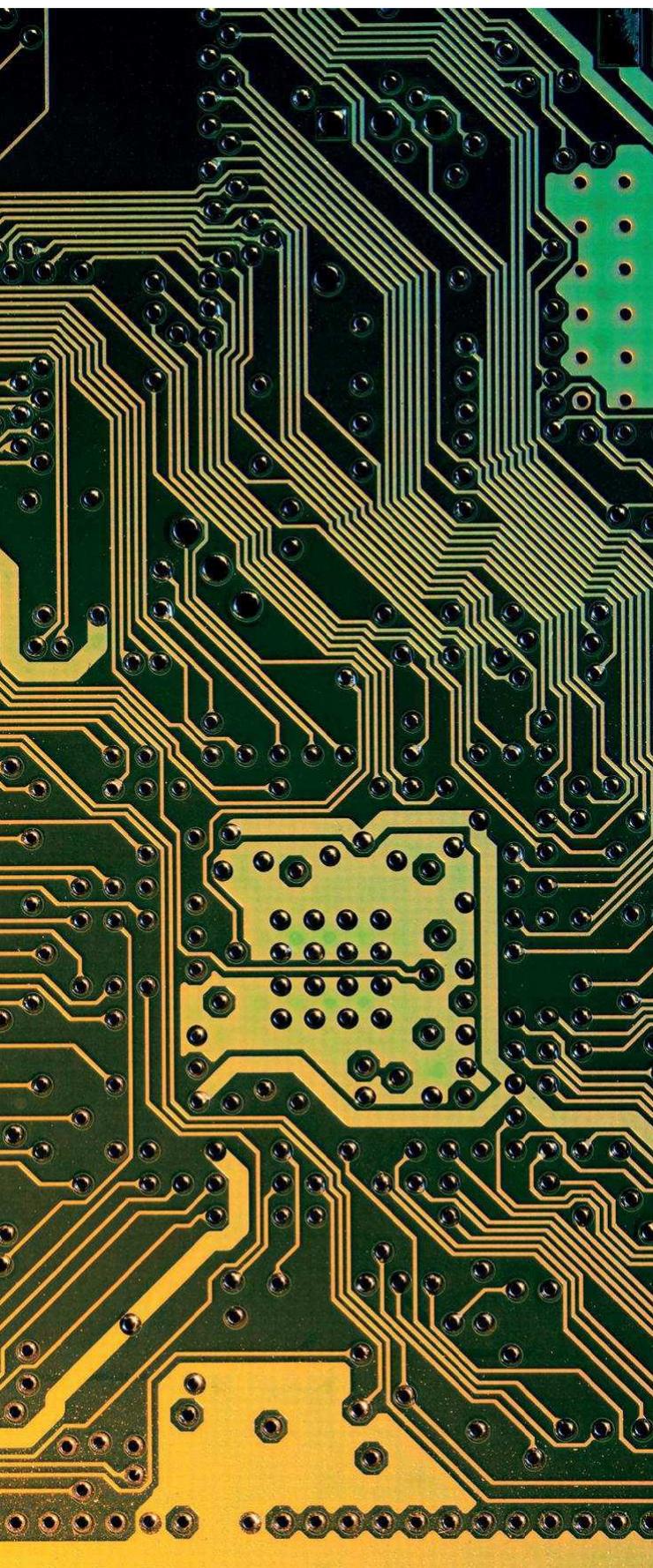
**Lo sviluppo tecnologico** degli ultimi decenni ci ha abituato all'idea di poter disporre di computer sempre più veloci e sempre più piccoli. Con l'aumento della potenza e la riduzione delle dimensioni sorge

il problema dell'energia necessaria ad alimentare questi computer. **Sono stati fatti** molti tentativi di successo per ridurre il consumo energetico delle macchine dedicate al calcolo. Ma qual è il limite teorico

in termini di energia da spendere, per poter effettuare un qualsiasi calcolo?

**Un esperimento degli autori** ha dimostrato che l'assunto per cui gli attuali dispositivi di calcolo debbono

per forza consumare una quantità minima di energia, conosciuto come principio di Landauer, è falso. I prototipi dell'esperimento non possono però sostituire l'attuale tecnologia dei microprocessori.



Come è possibile raggiungere questo obiettivo? Fino a quando potremo ridurre il consumo energetico di un microprocessore? Ovvero, esiste qualche limite teorico dovuto alle leggi fondamentali della natura che fissa il consumo minimo di un dispositivo di calcolo? È possibile immaginare la costruzione di un computer che possa funzionare consumando zero energia? Infine: avremo mai telefonini con batteria di durata illimitata?

## Informazione fisica

Queste domande non sono nuove, e i ricercatori se le sono poste fin dagli albori della scienza dei computer. Le prime risposte si devono a importanti protagonisti dell'informatica come Claude Shannon, John Von Neuman, Rolf Landauer (conosciuto anche con il nome di Ralph).

In particolare, proprio a Landauer, fisico di origine europea, che lavorò lungamente alla IBM negli Stati Uniti, è attribuito un importante risultato oggi chiamato «principio di Landauer». Per capire questo principio dobbiamo ricordare che ogni computer è in ultima analisi una macchina, quindi un sistema fisico, e come tale deve ubbidire alle leggi della fisica. In materia energetica, le leggi che governano i fenomeni fisici sono quelle della termodinamica. Nel 1961, in un articolo pubblicato su «IBM Journal of Research and Development» e diventato celebre, Landauer aveva fatto notare che l'applicazione di queste leggi al funzionamento dei computer impone limiti sull'energia che un computer deve usare durante il suo funzionamento. In particolare, il secondo principio della termodinamica richiede che durante ogni trasformazione che provochi una diminuzione di entropia, ovvero una riduzione del numero di stati fisici possibili, si debba spendere una certa quantità minima di energia e che quindi non possa essere fatta a spesa energetica nulla.

Ma quand'è che siamo costretti a fare una trasformazione caratterizzata da una diminuzione di entropia? Per capire bene questo punto consideriamo un'operazione che i computer devono fare spesso durante le operazioni di calcolo: la scrittura di una cella di memoria. In un computer i dati sono rappresentati mediante numeri binari: sequenze di «0» e «1». Questi numeri sono anche chiamati «bit» dalla contrazione delle parole *binary* e *digit*, ovvero cifre binarie. Per effettuare calcoli con numeri binari in un computer abbiamo bisogno di dispositivi fisici che possano assumere due diversi stati, per esempio «acceso» e «spento» oppure «aperto» e «chiuso». Questi dispositivi si chiamano interruttori binari (in inglese *binary switches*) e possono essere distinti in due grandi categorie: dispositivi combinatori (utili per effettuare calcoli veri e propri) e dispositivi sequenziali (utili per le memorie).

Un dispositivo combinatorio è un interruttore binario caratterizzato dal fatto che può cambiare il suo stato quando viene applicato un ingresso; una volta rimosso l'ingresso, l'interruttore binario torna allo stato iniziale. Pensate per esempio a una pallina su un piano, legata a una molla. Se applico una forza (l'ingresso del mio dispositivo), allora la molla si allunga e la pallina cambia posizione (l'uscita del mio dispositivo). Quando la forza viene rimossa, la pallina – grazie alla presenza della molla – ritorna nella posizione iniziale.

Un dispositivo sequenziale è simile a quello che abbiamo appena descritto, con la sola differenza che quando l'ingresso è rimosso allora non torna nello stato iniziale ma rimane nello stato in cui si trova (ecco perché è utile per le memorie). Come esempio possiamo immaginare la nostra pallina che si trovi in una scatola per uova con due alloggiamenti. Se applico una forza posso far

## Dispositivi reversibili e irreversibili

Una porta logica «OR» è un dispositivo combinatorio che ammette due ingressi e un'uscita. Il valore dell'uscita può essere «0» o «1» a seconda del valore degli ingressi, indicati per esempio come A e B: se sono entrambi «0», l'uscita è «0». In tutti gli altri casi l'uscita è «1» (*si veda la tabella*).

Le porte logiche possono distinguersi in porte «logicamente reversibili» e porte «logicamente irreversibili». Il concetto di irreversibilità logica è stato introdotto da Rolf Landauer in un articolo del 1961: «Diremo che un dispositivo è logicamente irreversibile se l'uscita di questo dispositivo non è sufficiente a identificare in modo univoco gli ingressi.» Se guardiamo l'uscita della nostra porta logica «OR», è chiaro che quando è «0» possiamo identificare l'ingresso come da-

to dalla combinazione «0» + «0». Tuttavia quando l'uscita è «1» non possiamo dire con certezza quale tra queste combinazioni di ingressi sia responsabile: «1» + «1»; «0» + «1»; «1» + «0». Da qui la conclusione che la porta logica «OR» è un tipico dispositivo logicamente irreversibile.

Come ha mostrato Charles Bennet, collega di Landauer, si possono fare calcoli usando un altro tipo di porte logiche che siano logicamente reversibili, come quelle ideate dall'italiano Tommaso Toffoli nel 1980, quando era al Massachusetts Institute of Technology (MIT), e da Edward Fredkin, sempre del MIT, nel 1983. Con queste porte, caratterizzate da un numero di uscite non inferiore al numero degli ingressi, conoscendo i valori delle uscite è sempre possibile risalire al valore degli ingressi.

| INGRESSO |   | USCITA |
|----------|---|--------|
| A        | B | A OR B |
| 0        | 0 | 0      |
| 0        | 1 | 1      |
| 1        | 0 | 1      |
| 1        | 1 | 1      |

cambiare alloggiamento alla pallina. Una volta rimossa la forza la pallina rimane nell'alloggiamento in cui si trova.

Per memorizzare un bit di informazione dobbiamo usare un dispositivo sequenziale e generare una trasformazione del suo stato fisico. Ciò si realizza in pratica associando uno stato logico, ovvero un valore del bit, a ciascuno dei due suoi stati fisici: per esempio associamo lo stato logico «0» all'interruttore aperto e lo stato logico «1» all'interruttore chiuso. Un dispositivo sequenziale lasciato a sé stesso raggiunge quello che si chiama stato di equilibrio termodinamico, ovvero può essere con eguale probabilità sia nello stato «0» sia nello stato «1». Quando si vuole memorizzare un bit, supponiamo il bit «0», si deve applicare una forza che rompe lo stato di equilibrio termodinamico e lo fa andare con certezza nello stato logico «0».

Questo passaggio non è altro che una trasformazione fisica che comporta una riduzione dell'entropia, il sistema passa così da due possibili stati a uno. Per il secondo principio della termodinamica, a questo dimezzamento dell'entropia corrisponde un'inevitabile spesa minima di energia determinata per la prima volta dal fisico austriaco Ludwig Boltzmann all'inizio del secolo scorso. A temperatura ambiente questa spesa minima vale una quantità piccolissima di energia: circa un millesimo di miliardesimo di miliardesimo di joule.

Landauer effettuò la sua analisi sull'energia dei computer mentre era all'IBM all'inizio degli anni sessanta. A quell'epoca era già diventata popolare la nozione di «quantità di informazione», un concetto introdotto una quindicina di anni prima da Claude Shannon, ingegnere elettronico statunitense che lavorava alla Bell, la grande azienda di telefoni del Nord America. In base a questa nozione, una memoria che non è scritta (cioè è all'equilibrio termodinamico) è un dispositivo caratterizzato da due bit di informazione. Nel senso che può trovarsi tanto nello stato logico «0» quanto nello stato logico «1». Se scrivo la mia memoria, costringendola nello stato «0», per esempio, riduco la sua quantità di informazione. Ovvero dimezzo il numero degli stati in cui si può trovare: da due a uno. Come abbiamo visto prima, a questa ope-

razione logica, una riduzione della quantità d'informazione, oggi nota come «reset di Landauer», corrisponde una trasformazione fisica che porta a una riduzione di entropia e quindi a una spesa energetica minima.

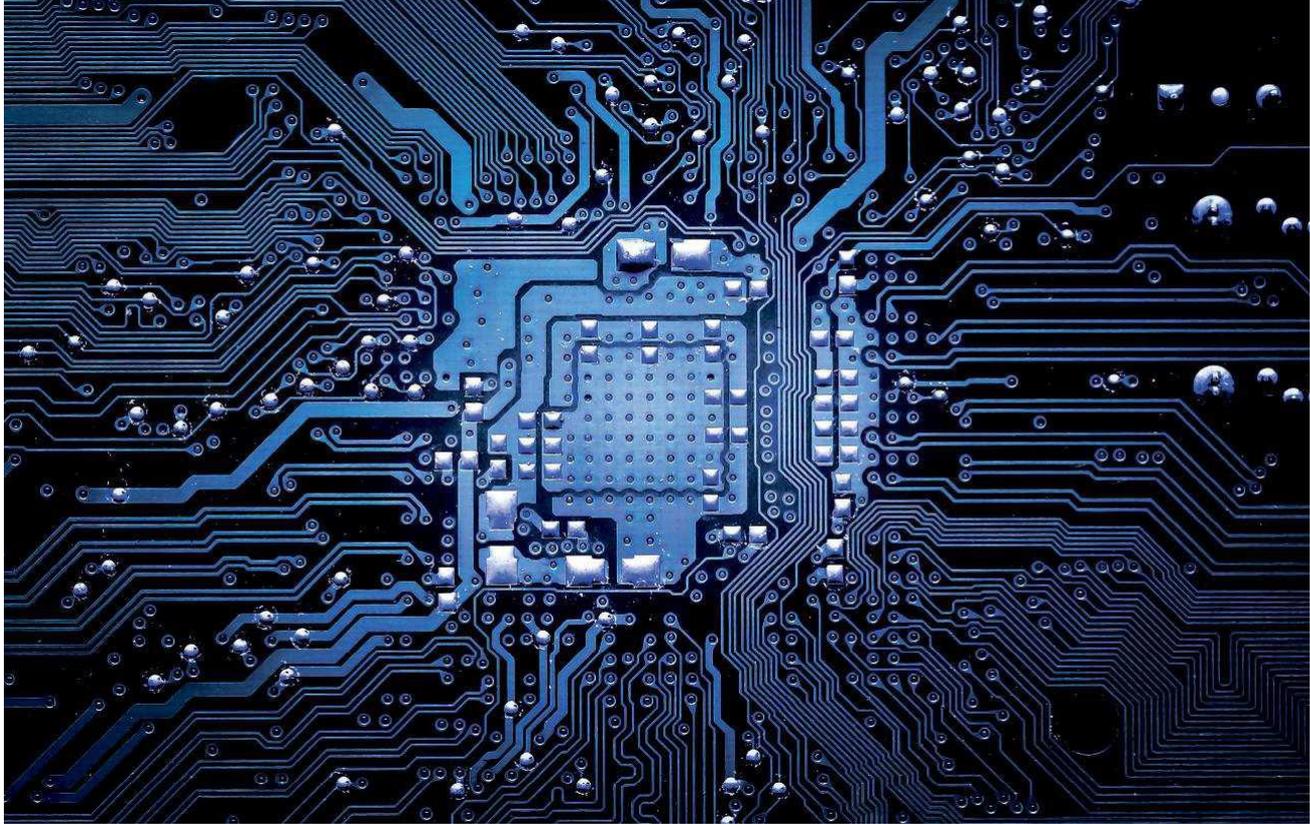
Da questo fenomeno Landauer ha tratto l'idea fondamentale alla base del principio che porta il suo nome: ogni volta che riduciamo la quantità di informazione in un dispositivo, questa operazione equivale a effettuare una corrispondente riduzione di entropia, e quindi necessita di una spesa energetica che non può essere zero. È in questo senso che deve essere interpretata la celebre frase di Landauer «*Information is physical*», l'informazione è una quantità fisica.

### Una spesa minima

Questa idea di associare un ruolo fisico alla quantità di informazione, una grandezza considerata fino ad allora puramente matematica, è diventata molto popolare negli anni sessanta e settanta e ha generato un certo numero di interpretazioni diverse, non tutte pienamente condivise nella comunità degli scienziati.

Una delle interpretazioni più controverse è relativa a quale sia la quantità minima di energia per poter fare un calcolo. Per poter rispondere a questa domanda occorre definire con precisione che cosa si intenda per «fare un calcolo». In genere per poter svolgere i compiti assegnati a un computer abbiamo bisogno di entrambi i dispositivi che abbiamo introdotto in precedenza: dispositivi sequenziali e dispositivi combinatori. I primi sono usati per costruire memorie. I secondi invece sono usati per effettuare le operazioni di calcolo vero e proprio.

Queste operazioni di calcolo, che di solito individuiamo come le quattro operazioni aritmetiche (somma, sottrazione, moltiplicazione e divisione) nei computer si fanno usando numeri binari e possono essere realizzate combinando quelle che si chiamano porte logiche. Una porta logica è quindi un dispositivo combinatorio usato per il calcolo. Un semplice esempio è la porta logica «OR» (*si veda il box in questa pagina*) ed è una porta logicamente irreversibile. Il concetto di irreversibilità logica è stato intro-



dotto proprio da Landauer nel suo famoso articolo del 1961: «Diremo che un dispositivo è logicamente irreversibile se l'uscita di questo dispositivo non è sufficiente a identificare in modo univoco gli ingressi».

L'idea di Landauer sul consumo energetico del calcolo è molto semplice, ed è stata espressa in un articolo scritto per «Scientific American» nel 1985: ogni volta che usiamo queste porte «logicamente irreversibili», dissipiamo energia nell'ambiente (si veda *I limiti fisici fondamentali del calcolo*, in «Le Scienze» n. 205, settembre 1985).

Inizialmente Landauer pensava che per fare calcoli fosse indispensabile usare porte logiche irreversibili. In seguito, all'inizio degli anni settanta, il suo collega Charles Bennet dell'IBM mostrò che per fare calcoli è possibile usare anche un altro tipo di porte logiche, dette «porte reversibili». Nelle porte reversibili, conoscendo lo stato logico delle uscite si può sempre ricavare matematicamente lo stato logico di tutti gli ingressi (si veda il box nella pagina a fronte).

Quindi l'idea di Landauer, condivisa anche da Bennet, può essere riassunta così: data una qualunque porta logica, il suo funzionamento è necessariamente legato a una spesa energetica minima, misurata dal decremento della quantità di informazione che si trova all'uscita della porta logica rispetto a quella che si trova al suo ingresso. In questo senso Landauer tratta le porte logiche come aveva fatto con le memorie: decremento di informazione uguale spesa minima di energia.

Nelle porte logiche reversibili di interesse pratico il numero delle uscite è uguale al numero degli ingressi, quindi questo decremento di informazione non c'è, e possono essere fatte funzionare senza spendere energia. Chiaramente non è questo il caso delle porte logiche come la «OR» che con due ingressi e un'uscita si trova ad avere un decremento di un bit di informazione. Per Landauer una porta «OR» non può essere fatta operare spendendo energia inferiore a una certa quantità, oggi nota come «limite di Landauer».

In sintesi possiamo dire che, grazie al lavoro di Landauer e

Bennet, si è diffusa nella comunità scientifica l'idea che sia possibile fare un calcolo spendendo energia nulla solo usando porte logiche reversibili. Da questa convinzione è nata una branca della scienza dei computer che prende appunto il nome di «calcolo reversibile». Finora però questa disciplina ha trovato poche applicazioni, sia perché non ci sono molte realizzazioni pratiche di porte logiche reversibili sia perché i consumi energetici delle attuali porte logiche sono milioni di volte superiori al supposto limite di Landauer a causa di dissipazione e attrito di varia natura, e quindi passare a porte reversibili non cambierebbe in pratica la quantità di energia richiesta. Tuttavia, anche se la differenza dal punto di vista tecnologico al momento non sarebbe significativa, da un punto di vista della fisica fondamentale questo fa una grande differenza concettuale.

Come abbiamo accennato precedentemente, la quantità di energia minima da spendere per effettuare un calcolo con una porta logica irreversibile, il limite di Landauer, è molto piccola. Fino a qualche tempo fa non disponevamo delle tecnologie adatte a misurare queste minuscole quantità di energia, così la teoria di Landauer è rimasta per lungo tempo priva di verifiche sperimentali. Solo di recente alcuni laboratori in giro per il mondo hanno cominciato a condurre test diretti.

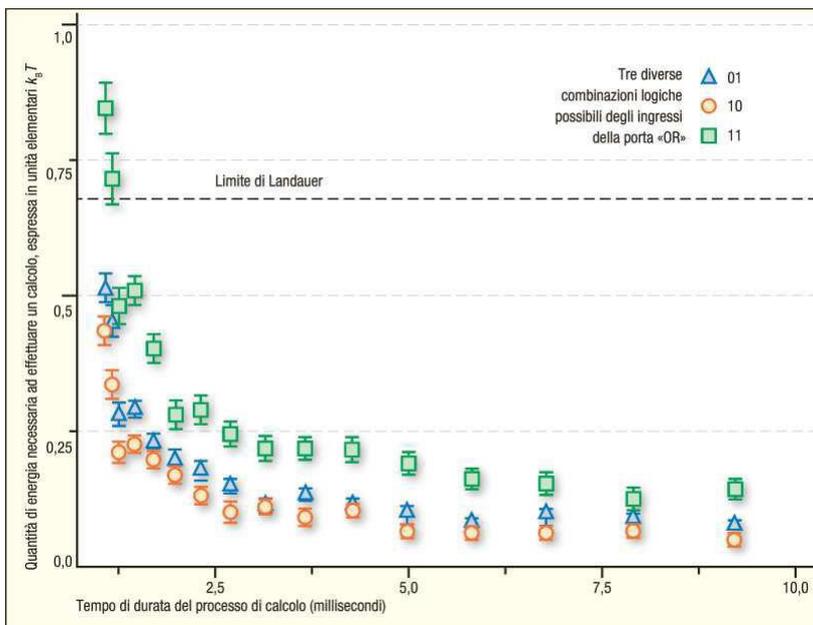
Nel 2012 Eric Lutz, allora all'Università di Augusta, in Germania, e Sergio Ciliberto, dell'Università di Lione, in Francia, con i loro colleghi, hanno testato l'operazione di «reset di Landauer» usando una piccola pallina in sospensione in un liquido, intrappolata con la luce. La quantità minima di energia da loro misurata durante la scrittura del bit di memoria, come mostrato su «Nature», è risultata in accordo con la previsione di Landauer. Due anni dopo John Bechhoefer e colleghi, della Simon Fraser University, in Canada, hanno ripetuto l'esperimento, confermando il risultato su «Physical Review Letters». Nonostante in questi anni siano stati condotti altri esperimenti legati agli aspetti di questa teoria, non è mai stata testata in modo diretto l'affermazione secondo cui non fosse possibile operare un dispositivo logicamente irreversibile spendendo un'energia arbitrariamente bassa.

# Landauer messo alla prova

Al NiPS Lab dell'Università di Perugia abbiamo costruito un dispositivo combinatorio che può essere usato per effettuare le operazioni di una porta logica «OR» con l'obiettivo di testare la teoria di Landauer. Il dispositivo è costituito da una lamella di nitruro di silicio lunga circa 200 micrometri e spessa 500 nanometri, a forma di «V» capovolta, che può essere piegata mediante una forza elettrostatica esercitata da due punte metalliche vicine, a cui viene applicata una certa differenza di potenziale (illustrazione a fronte).

Questa lamella funziona come un interruttore binario e può essere usata per le operazioni di una porta logica «OR». Se non è applicata tensione elettrica alle punte, la lamella rimane nella posizione verticale. A questa posizione associamo lo stato logico «0». Se invece è applicata tensione a una o a entrambe le punte, la lamella si piega per forza elettrostatica e possiamo associare a questo «stato piegato» lo stato logico «1». Interpretando assenza o presenza di tensione nelle punte come valori di ingresso logico «0» e «1», possiamo verificare che questo dispositivo realizza le funzioni di una porta logica «OR» (si veda il box a p. 56).

Nella colonna di sinistra dell'illustrazione della pagina a fronte è mostrata la misurazione della posizione della punta nei tre casi d'interesse. Poiché la lamella è molto piccola, lo spostamento della punta in conseguenza del piegamento è anch'esso molto piccolo, e soggetto a fluttuazioni termiche. La posizione della punta si distribui-



sce statisticamente secondo la legge di Gauss, ed è centrata attorno al suo valor medio. Lo spostamento medio, in occasione dello stato degli ingressi «0» + «1» e «1» + «0» è simile, e in valore di poco inferiore a 1 nanometro, mentre quello corrispondente allo stato degli ingressi «1» + «1» si attesta attorno a 1,1 nanometri. Nel grafico qui sopra sono riportate tre curve relative alla misurazione effettuata con le tre configurazioni di ingresso.

Per ciascuna si nota che al crescere della durata del ciclo si ottiene un calo dell'energia dissipata. Questo fenomeno è associabile a fenomeni di attrito nel movimento della lamella. Più lentamente si procede, più si riducono le dissipazioni e ci si avvicina alla condizione di trasformazione adiabatica, in cui cioè non c'è uno scambio netto di calore con l'ambiente. Quasi tutte le misurazioni mostrano valori di energia usata inferiori a quello che la teoria di Landauer richiederebbe.

## Testare il limite

Circa cinque anni fa abbiamo proposto alla Commissione Europea di finanziare un progetto di ricerca finalizzato a studiare questi aspetti di calcolo «a zero energia». Il progetto, iniziato nel settembre 2012, ha visto la partecipazione di sei gruppi europei ed è stato coordinato dall'Università di Perugia. Non a caso il titolo del progetto è stato «LANDAUER». Dopo tre anni di lavoro abbiamo ottenuto interessanti risultati, che di recente sono stati pubblicati su prestigiose riviste internazionali. Uno dei più interessanti è stato proprio quello ottenuto durante il test sperimentale del principio di Landauer, applicato alle porte logiche irreversibili.

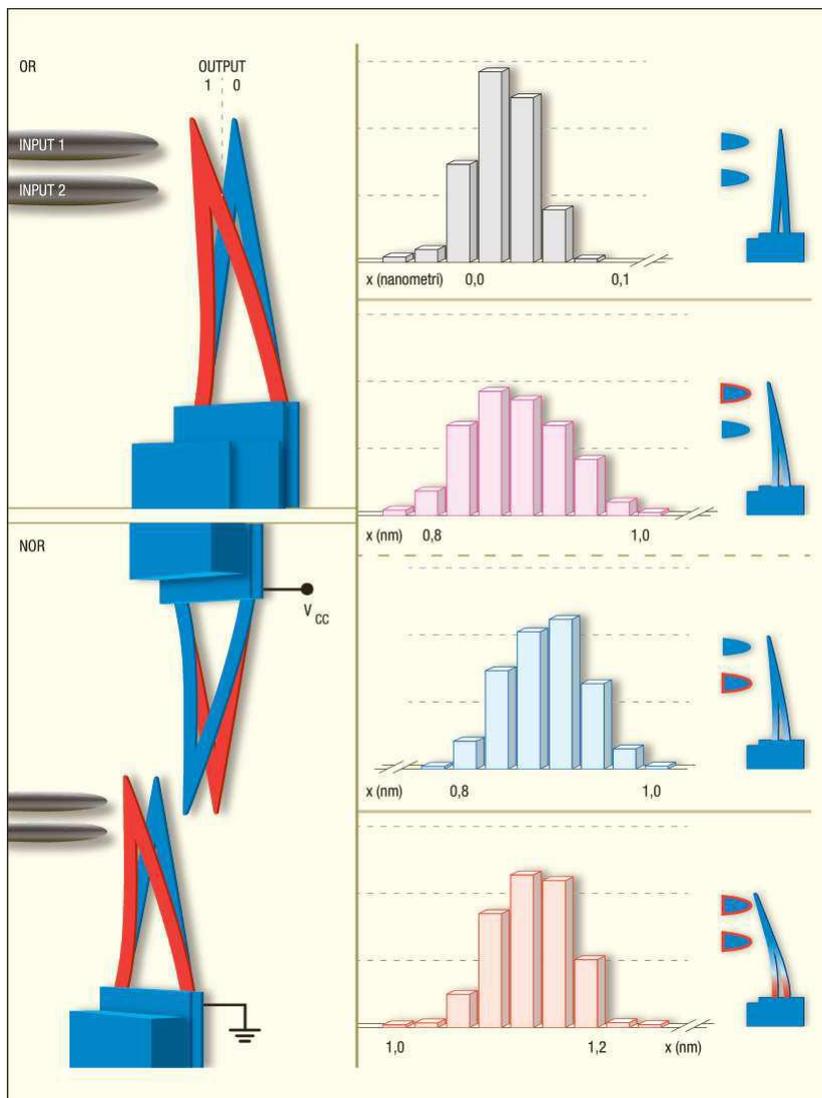
Al Laboratorio NiPS, presso il Dipartimento di fisica e geologia dell'Università di Perugia, abbiamo costruito una porta logica «OR», sfruttando la tecnologia micro-elettromeccanica (si veda l'illustrazione a fronte). La nostra porta realizzata con una piccola lamella sottoposta a forze elettrostatiche è un esempio di porta logica irreversibile: se ci concentriamo sulla combinazione di ingressi «0» + «1» e «1» + «0» possiamo riconoscere che dalla sola osservazione dello stato dell'uscita, rappresentato dalla posizione della punta, è impossibile indovinare se ci si trovi nell'una o nell'altra delle due configurazioni possibili. Questa condizione realizza il concetto di irreversibilità logica come evidenziato da Landauer.

Per poter sottoporre a test l'esistenza del limite di Landauer per porte logiche, abbiamo fatto un grande numero di misurazioni della quantità di lavoro effettuato dalle forze elettriche per piegare la lamella, in diverse condizioni del valore degli ingressi e anche a diverse velocità di trasformazione. Grazie a cicli ripetuti del test, abbiamo trovato che quasi tutte le misurazioni mostrano valori di energia usata inferiori a quello che la teoria di Landauer richiederebbe. Questi dati, pubblicati di recente su «Nature Communications», indicano che, contrariamente a quanto sostenuto dalla teoria di Landauer, è possibile operare porte logiche irreversibili spendendo energia arbitrariamente piccola.

## Una questione di linguaggio

È presto per poter dire come verrà accolta questa scoperta dalla comunità scientifica internazionale. Tuttavia è certo che fin dagli esordi la teoria di Landauer si è caratterizzata come piuttosto controversa. Acclamata dagli ingegneri elettronici e dell'informazione, ha spesso trovato opposizione nel mondo della fisica statistica. A nostro avviso ciò è largamente dovuto a incomprensioni causate dall'uso di linguaggi diversi. Landauer assume un linguaggio che è proprio della teoria dell'informazione ma che male si adatta alla fisica. Parla di «ingresso» e «uscita» di un dispositivo di cal-

Danilo Sossi (su indicazione degli autori)



**Misure di porte.** Nella colonna a sinistra: in alto, schema di funzionamento della porta logica «OR» basata su una lamella micro-elettromeccanica. In basso: funzionamento di una porta «NOR», ottenuta dalla combinazione di due lamelle. Nella colonna a destra: misurazione dello spostamento della punta per tre diverse combinazioni dello stato degli ingressi.

da altri esperimenti indipendenti, allora occorrerà rivedere profondamente la fisica del calcolo, e la teoria di Landauer, come molte altre nella storia, dovrà essere aggiornata alla luce di nuove prove sperimentali.

## Ritorno al passato

La mancanza di un limite minimo all'energia necessaria per poter operare una porta logica irreversibile apre la strada alla realizzazione di microprocessori di nuova generazione che non siano più limitati da una ben definita quantità minima di calore da dissipare. Per mostrare che questa è una strada percorribile, nel nostro laboratorio abbiamo anche realizzato una porta logica universale NOR. Combinando insieme più porte NOR, è possibile eseguire tutte le operazioni logiche e aritmetiche tipiche di un microprocessore.

Il prossimo passo sarà far funzionare un dispositivo per il calcolo della somma di due numeri binari, chiamato *full adder* (sommatore completo). Abbiamo già progettato la configurazione di lamelle che ci permetterà di costruire un *full adder* e di misurare il consumo energetico durante il funzionamento.

Chiaramente siamo coscienti che questi nostri prototipi micro-elettromeccanici non possono costituire di per sé una valida alternativa

ai circuiti CMOS (acronimo di Complementary Metal-Oxide Semiconductor) che sono attualmente impiegati nei microprocessori: sebbene milioni di volte più efficienti come consumo energetico, i nostri prototipi sono troppo lenti e troppo ingombranti.

Tuttavia indicano una strada che potrebbe portare i computer di domani ad abbandonare la tecnologia microelettronica su cui sono basati i transistor per abbracciare dispositivi nanomeccanici. Una sorta di ritorno al passato, quando le calcolatrici funzionavano con ingranaggi azionati a manovella. Il futuro dei sistemi di calcolo si prospetta imprevedibile e interessante: siamo tutti chiamati a immaginare nuovi telefonini con batterie di durata... potenzialmente illimitata. ■

colo e associa a queste «due parti del sistema» un certo quantitativo di informazione.

Ora, se guardiamo ai dispositivi di calcolo ci accorgiamo che il ruolo degli ingressi può essere assegnato alle forze che agiscono sul sistema, mentre il ruolo dell'uscita è rappresentato dallo stato del sistema. In questo senso gli ingressi sono semplicemente la causa della variazione dello stato del sistema ma non contano ai fini del calcolo della variazione dell'entropia perché non sono parte del sistema fisico che subisce la trasformazione.

Nella visione di Landauer quello che conta è la differenza di quantità d'informazione tra ingresso e uscita, interpretata come variazione di entropia. La visione termodinamica ragiona invece sulla trasformazione da uno stato iniziale a uno stato finale. Per la termodinamica conta solo la variazione di entropia tra questi due stati. O meglio, conta solo la variazione di entropia quando lo stato del sistema cambia nel tempo, sotto l'azione della forza. Quindi, se si riesce a eseguire una trasformazione tra stato iniziale e stato finale in cui l'entropia rimane costante, per le leggi della fisica questa può essere realizzata a costo zero, indipendentemente da quanti bit erano presenti all'ingresso, ovvero indipendentemente da quante forze indipendenti agivano sul sistema.

Se i risultati del nostro esperimento saranno confermati anche

ai circuiti CMOS (acronimo di Complementary Metal-Oxide Semiconductor) che sono attualmente impiegati nei microprocessori: sebbene milioni di volte più efficienti come consumo energetico, i nostri prototipi sono troppo lenti e troppo ingombranti. Tuttavia indicano una strada che potrebbe portare i computer di domani ad abbandonare la tecnologia microelettronica su cui sono basati i transistor per abbracciare dispositivi nanomeccanici. Una sorta di ritorno al passato, quando le calcolatrici funzionavano con ingranaggi azionati a manovella. Il futuro dei sistemi di calcolo si prospetta imprevedibile e interessante: siamo tutti chiamati a immaginare nuovi telefonini con batterie di durata... potenzialmente illimitata. ■

## PER APPROFONDIRE

**Sub-kBT Micro-Electromechanical Irreversible Logic Gates.** López-Suárez M., Neri I. e Gammaitoni L., in «Nature Communications», Vol. 7, articolo n. 12068, pubblicato on line il 28 giugno 2016.

**Exploring the Thermodynamic Limits of Computation in Integrated Systems: Magnetic Memory, Nanomagnetic Logic, and the Landauer Limit.** Lambson B., Carlton D. e Bokor J., in «Physical Review Letters», Vol. 107, p. 010604, 1 luglio 2011.

**I limiti fisici fondamentali del calcolo.** Bennet C.H. e Landauer R., in «Le Scienze» n. 205, settembre 1985.