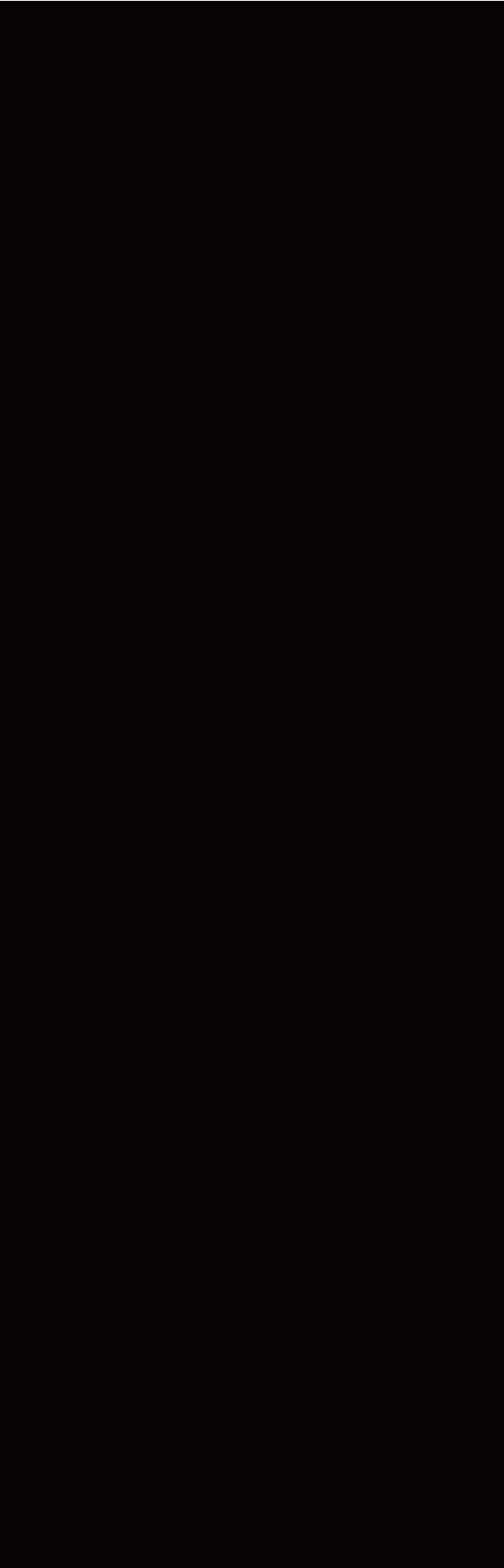


[equazioni]

anno 10 numero **19** / 10.15

asimmetrie

rivista semestrale dell'Istituto
Nazionale di Fisica Nucleare



asimmetrie

Cari lettori di Asimmetrie,

A scuola abbiamo imparato a risolvere le equazioni, almeno quelle più semplici. Ma forse non abbiamo capito una cosa fondamentale. Un'equazione non è un insieme di simboli astratti che serve a farci prendere un buon voto quando riusciamo a venirne a capo. Un'equazione serve a descrivere come funziona il nostro universo. Certamente, la matematica è la lingua della fisica, ma anche della chimica, della biologia e persino (anche se con discutibile successo) dell'economia. Senza trascurare la statistica che ci aiuta, ad esempio, a prendere decisioni in modo informato, anche se poi il gioco d'azzardo sembra negare questo fatto. Non possiamo non rimanere impressionati da come una serie di simboli uguagliata a un insieme, a prima vista altrettanto oscuro, di altri simboli sia in realtà capace di descrivere il moto dei pianeti intorno alla loro stella, l'espansione senza fine dell'universo, la capacità del misterioso bosone di Higgs di dotare i mattoncini del mondo di una massa e quella di una particella di vivere più o meno a lungo, a seconda della sua velocità... ma anche l'equilibrio di una soluzione chimica o la complessa relazione tra reddito e capitale. Credo che, nell'infinito dibattito su cosa sia cultura, ci sia una risposta semplice. La capacità di comprendere cosa si sta leggendo. E questo prevede di essere capaci di apprezzare sia l'infinita ricchezza della Commedia, sia la stupefacente semplicità dell'equazione di Newton.

Buona lettura.

Fernando Ferroni
presidente Infn



asimmetrie

Rivista dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

Semestrale, anno 10,
numero 19, ottobre 2015

direttore responsabile

Fernando Ferroni, *presidente Infn*

direttore comitato scientifico

Egidio Longo

comitato scientifico

Vincenzo Barone
Massimo Pietroni
Giorgio Riccobene
Barbara Sciascia

caporedattore

Catia Peduto

redazione

Eleonora Cossi
Vincenzo Napolano
Davide Patitucci
Francesca Scianitti
Antonella Varaschin
Francesca Cuicchio
(infografica)

hanno collaborato

Riccardo Barbieri, Carlo Bernardini,
Valerio Bocci, Edoardo Boncinelli,
Angelo Carbone, Stefano Giusto,
Sabino Matarrese, Tuono Pettinato,
Antonio Davide Polosa, Lucio Russo,
Fulvio Ricci, Tommaso Spadaro,
Graziano Venanzoni

contatti redazione

Infn Ufficio Comunicazione
piazza dei Caprettari 70
I-00186 Roma
T +39 06 6868162
F +39 06 68307944
comunicazione@presid.infn.it
www.infn.it

impaginazione

Istituto Arti Grafiche Mengarelli

stampa

IAG Mengarelli

su carta di pura cellulosa
ecologica ECF
Fedrigoni Symbol™ Tatami
250 - 135 g/m²

Registrazione del Tribunale di Roma
numero 435/2005 del 8 novembre 2005.
Rivista pubblicata da Infnn.

Tutti i diritti sono riservati. Nessuna parte della
rivista può essere riprodotta, rielaborata o
diffusa senza autorizzazione scritta dell'Infn,
proprietario della pubblicazione.

Finita di stampare nel mese di ottobre 2015.
Tiratura 17.000 copie.

come abbonarsi

L'abbonamento è gratuito.

Tre modi per abbonarsi:

Compilare l'apposito form sul sito
www.asimmetrie.it

Inviare una mail di richiesta a
comunicazione@presid.infn.it

Contattare la redazione

sito internet

Asimmetrie 19 e tutti i numeri
precedenti della rivista sono
disponibili anche online su
www.asimmetrie.it

e-magazine

Asimmetrie è anche disponibile in
versione digitale, ricca di ulteriori
contenuti multimediali, come app di
iOS e Android sull'Apple Store e nel
Google Play Store.

crediti iconografici

Foto copertina ©ventdusud (depositphotos) //
foto p. 4 ©Tim Wetherell&Charles
Lineweaver/Australian National University; foto
a p. 5 ©F.Cuicchio/Asimmetrie-Infn; foto b p. 6
©AIP Emilio Segre Visual Archives; foto p. 7
©liveostockimages; fig. pp. 8-9 ©Asimmetrie-
Infn; foto c p. 10 ©feynman.net; fig. d p. 11
©Asimmetrie-Infn // foto a p. 12 ©Gary Wysin;
foto b p. 13 ©Mary Evans/AGF; foto p. 14 ©F.
Cuicchio/Asimmetrie-Infn; foto c p. 15 ©Cern
// foto p. 16 ©C.Peduto/Asimmetrie-Infn; fig. a
p. 17 ©CMS Collaboration/Natalie Landsberg;
foto b p. 18 ©Cern // foto p. 19 ©A.
Pozzi/Asimmetrie-Infn; foto b p. 20 ©Max-
Planck-Institute, courtesy AIP Emilio Segre
Visual Archives; foto c p. 21 ©AIP Emilio Segre
Visual Archives // foto b p. 23 ©D.
Santonocito/Infn; fig. d p. 25 ©Reidar
Hahn/Fermilab // foto a p. 26 ©Joshua
Thompson; foto b p. 27 ©Bettmann/CORBIS;
fig. c p. 28 ©Asimmetrie-Infn // foto a p. 29
©Tristan Savatier – www.loupiote.com; fig. b p.
30 ©Asimmetrie-Infn; foto c p. 31
©M.Perciballi/Virgo // foto a p. 32 ©Csaba
Toth; foto b p. 33 ©F.Cuicchio/Asimmetrie-Infn;
fig. c p. 34 ©Asimmetrie-Infn; foto d p. 34
©Esa // foto a p. 33 ©Thomas Schneider,
2002, [http://alum.mit.edu/www/toms/
boltzmann.html](http://alum.mit.edu/www/toms/boltzmann.html); foto b p. 35 ©ESO/M.
Kornmesser; fig. c p. 38 ©Asimmetrie-Infn //
vignetta p. 39 ©Tuono Pettinato // foto a p.
40 ©2015. Foto Scala, Firenze; fig. b p. 41
©Asimmetrie-Infn // fig. a p. 42 ©Sebastian
Kaulitzki; fig. b p. 43 ©blueringmedia // foto a
p. 44 ©Mary Evans/AGF; foto b p. 45 ©Dario
Cimaglia // foto p. 46 ©Lorenzo Calibbi //
foto p. 47 ©A. Varaschin/Asimmetrie-Infn //
foto p. 48 ©C. Peduto/Asimmetrie-Infn.

Per la foto a p. 23 si ringrazia l'U.O.C.
Medicina Nucleare - Centro PET/CT - Ciclotrone
- Azienda Ospedaliera per l'Emergenza
Cannizzaro – Catania.

Per la foto a p. 33 si ringrazia la caffetteria di
piazza S. Eustachio.

Ci scusiamo se, per cause del tutto
indipendenti dalla nostra volontà, avessimo
omesso o citato erroneamente alcune fonti.

as

19 / 10.15

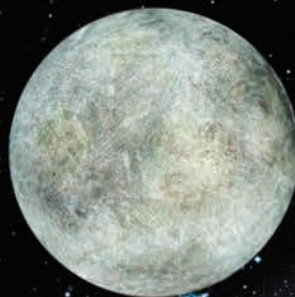
[equazioni]

L'alfabeto della natura di Carlo Bernardini	4	[as] con altri occhi Prestato alla scienza. di Tuono Pettinato	39
Campi di luce di Angelo Carbone	12	[as] radici Figure vs. equazioni. di Lucio Russo	40
Creare materia di Tommaso Spadaro	16	[as] intersezioni Biologia fuori legge. di Edoardo Boncinelli	42
Un mondo indeterminato di Antonio Davide Polosa	19	[as] riflessi Equazioni di piombo. di Eleonora Cossi	44
Un mare di antimateria di Graziano Venanzoni	22	[as] traiettorie I conti con le parole. di Davide Patitucci	46
Tutto in una di Riccardo Barbieri	26	[as] spazi Scienza al mercato. di Vincenzo Napolano	47
Geometrica bellezza di Fulvio Ricci	29	[as] illuminazioni Rivelatori fai da te.	48
Hot stories di Sabino Matarrese	32		
La misura del disordine di Stefano Giusto	36		

L'alfabeto della natura

Le equazioni
che governano il mondo

di Carlo Bernardini



Il mondo attorno a noi è fatto di noi stessi e dell'ambiente in cui viviamo, vicino e lontano, visibile e invisibile. Nell'ambiente ci sono oggetti e fenomeni che si svolgono nel tempo e ce ne danno la percezione. Tutto questo sembra evolvere seguendo regole precise che, sin dall'antichità chiamiamo "leggi di natura", benché, con la meccanica quantistica, anche il "caso" sembra essere entrato nel novero dei motori del cambiamento, accanto ai rapporti di causa ed effetto.

La descrizione degli eventi richiede una tecnica di registrazione che, come requisito generale minimo, ha bisogno di un sistema di riferimento spaziale, in tre dimensioni, più un insieme di orologi disseminati in tutto lo spazio e sincronizzati, e altri strumenti di misura. È diffuso l'uso di adottare, per lo spazio, una terna di assi cartesiani realizzati con l'incrocio di superfici piane rigide ortogonali, anche se questa non è la sola possibilità. Per il tempo, la misura si basava in passato sulla regolare scansione di fenomeni astronomici periodici, mentre oggi fa riferimento a oscillazioni atomiche. Ci sono poi strumenti che misurano la massa, l'elasticità dei corpi, la fluidità dei liquidi, le forze (spinte, attrazioni, ecc.), le frequenze e altre quantità, il che richiede l'adozione di un vasto sistema convenzionale di unità di misura per ciascun tipo di grandezza misurata.

Le leggi di natura sono espresse matematicamente da relazioni tra grandezze fisiche del tipo $A = B$ (equazioni di questo genere sono quasi tutte quelle discusse nelle prossime pagine) oppure $A > B$ (un'importante disuguaglianza è il *principio di indeterminazione* di Heisenberg, vd. p. 19). A e B sono combinazioni o funzioni di altre grandezze e, nel caso delle *leggi di evoluzione* (vd. approfondimento a p. 7), contengono delle *derivate*, cioè delle variazioni temporali e spaziali. Un principio universalmente valido che si applica a tutte le leggi è il *principio di omogeneità*: A e B devono avere le stesse unità di misura, il che significa che il loro rapporto deve essere un numero puro (questo principio, lungi dall'essere una banale astrazione, porta in certi casi a risultati concreti attraverso ragionamenti di scala, che rappresentano una generalizzazione della nozione geometrica di similitudine).

Il prototipo di tutte le leggi matematiche della natura è la *legge della gravitazione universale di Newton*. Questa legge afferma che la forza di gravità tra due corpi è proporzionale alle masse m e m' dei corpi e inversamente proporzionale al quadrato della loro distanza. In notazione moderna, la scriviamo come $F = Gmm'/r^2$, dove G è la costante di Newton. Combinata con l'equazione fondamentale della dinamica $F = ma$ (forza = massa per

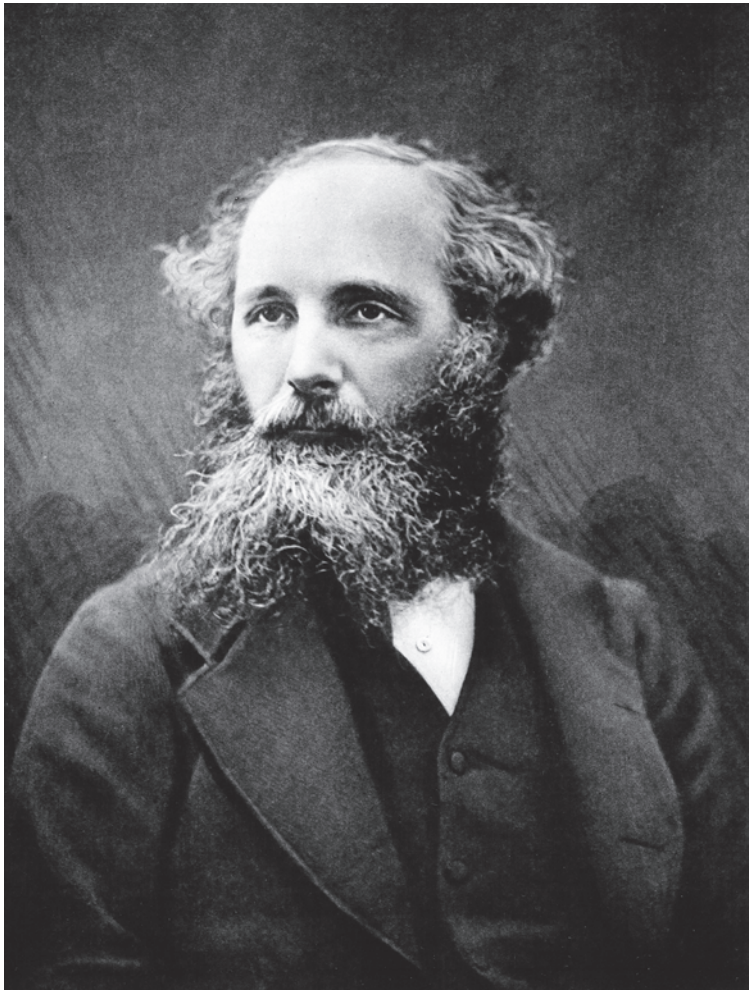


a.
La legge di gravitazione universale di Newton (il valore della costante di Newton G è pari a $6,67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$).

accelerazione), la legge newtoniana della gravità permette di calcolare con grande precisione i moti planetari e per secoli è stata alla base della meccanica celeste. Solo nel 1915 è stata soppiantata dalla legge della gravitazione di Einstein (l'equazione della relatività generale, vd. p. 29), che la incorpora come caso limite (valido quando il campo gravitazionale è debole e non modifica sensibilmente lo spaziotempo).

Affinché il primo e il secondo membro dell'equazione della gravità di Newton siano espressi entrambi nelle unità di misura della forza, in base al principio di omogeneità, è necessario che la costante G non sia un numero puro, ma abbia anch'essa delle opportune unità di misura. Infatti, se ponessimo G uguale a 1 (analogamente a quel che si fa in relatività, dove si pone la velocità della luce nel vuoto c uguale a 1, misurando le lunghezze in tempi-luce), dovremmo misurare le masse in metri e secondi, anziché in chilogrammi!

Fino all'inizio del XIX secolo, si riteneva che tutti i fenomeni fisici fossero riconducibili al moto di corpi materiali soggetti ad azioni a distanza (come la forza di gravità e altre forze modellate su questa). Le entità fondamentali erano quindi particelle, cioè oggetti localizzati la cui posizione spaziale è specificata da tre coordinate cartesiane funzioni del tempo, $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$. Le equazioni della dinamica permettevano, una volta risolte, di determinare queste leggi temporali. Nel corso dell'800 emerse un'altra importantissima nozione, quella di *campo*, di cui siamo debitori soprattutto a James Clerk Maxwell. L'elettromagnetismo è una fisica di campi, cioè di entità diffuse nello spazio, rappresentate da funzioni del tipo $A(x,y,z,t)$, che dipendono dalle coordinate spaziali e dal tempo. I campi sono retti anch'essi da equazioni di evoluzione che permettono di prevedere la configurazione di un campo in un qualunque istante futuro, una volta che sia nota la sua configurazione nell'istante iniziale.



b.
Il padre della teoria
elettromagnetica, James Clerk
Maxwell.

Leggi ed equazioni per tutti i gusti



Sebbene siano tutte riconducibili a uguaglianze o disuguaglianze tra grandezze, del tipo $A = B$ e $A > B$, le leggi della natura sono molto diverse tra loro, sia per la matematica che coinvolgono, sia per il loro status fisico: esistono leggi universali e leggi di applicabilità limitata, leggi che permettono di predire l'evoluzione nel tempo dei sistemi e leggi che descrivono il mondo così com'è in un determinato istante. È impossibile classificare in maniera esauriente tutte le leggi fisiche, ma possiamo tentare di illustrarne alcuni tipi (vd. anche pp. 8, 9). L'equazione di Newton $F = ma$ combinata con la legge di gravitazione universale, le equazioni di Maxwell (vd. p. 12), l'equazione di Dirac (vd. p. 22) e l'equazione della relatività generale (vd. p. 29) sono esempi di leggi di evoluzione, leggi di grande generalità che governano un vasto numero di fenomeni. Da un punto di vista matematico, si tratta di equazioni differenziali, cioè di equazioni in cui compaiono le variazioni istantanee (le cosiddette derivate) di funzioni che descrivono lo stato di un sistema (la posizione e la velocità delle particelle in meccanica classica, i campi nell'elettromagnetismo, la funzione d'onda in meccanica quantistica). Per

risolvere le equazioni dinamiche, bisogna conoscere le condizioni iniziali, cioè lo stato del sistema in un istante iniziale. Queste condizioni sono in genere aleatorie e non soggette ad alcuna regolarità, ma determinano, assieme alle leggi di evoluzione, gli stati successivi del sistema.

La relazione tra energia e massa, il principio di indeterminazione di Heisenberg (vd. p. 19), la relazione tra energia e temperatura (vd. p. 32) e l'equazione di Boltzmann (vd. p. 36), sono esempi di leggi che possiamo chiamare leggi di stato, perché evidenziano delle connessioni stabili tra diverse proprietà di un sistema. In alcuni casi queste leggi convertono certe grandezze in altre: per esempio, $E = mc^2$ (o $E^2 = p^2c^2 + m^2c^4$ nella sua forma più generale, vd. p. 16) converte masse in energie e viceversa, mentre le leggi della meccanica statistica ($E = kT$ e $S = k \log W$) convertono grandezze macroscopiche (la temperatura T e l'entropia S) in grandezze microscopiche (l'energia delle particelle E e il numero di stati microscopici W).

A differenza che nelle società democratiche, nella fisica c'è qualcosa che sta al di sopra delle leggi: sono i principi di simmetria, che svolgono il ruolo di

"superleggi". Come diceva il fisico teorico Eugene Wigner, "le simmetrie sono leggi che le leggi di natura devono rispettare". I principi di simmetria stabiliscono che le leggi di evoluzione devono essere invarianti rispetto a certe trasformazioni: per esempio, rispetto agli spostamenti spaziali e temporali, rispetto alle rotazioni, rispetto alle trasformazioni di Lorentz, che fanno passare da un sistema di riferimento a un altro (questo particolare principio di simmetria è chiamato principio di relatività) o rispetto ad alcune trasformazioni della funzione d'onda. Come dimostrò la matematica tedesca Emmy Noether nel 1918, le simmetrie hanno come necessaria conseguenza le leggi di conservazione, un'altra importante classe di leggi fisiche (vd. in Asimmetrie n. 11 p. 14, ndr). Queste leggi stabiliscono che nel corso dei fenomeni alcune grandezze – l'energia, la quantità di moto, il momento angolare, la carica elettrica, ecc. – non variano. Sono, forse, gli strumenti più utili e più comodi del fisico, perché permettono di ottenere informazioni sui processi per mezzo di una matematica elementare. [Vincenzo Barone]

Le leggi fondamentali della fisica sono leggi di evoluzione, che permettono di determinare lo stato di un sistema in ogni istante, una volta che sia noto il suo stato iniziale. Queste leggi sono soggette ai principi di simmetria, direttamente legati a loro volta alle leggi di conservazione: le simmetrie spazio-temporali corrispondono alla conservazione dell'energia, della quantità di moto e del momento angolare, mentre le simmetrie *di gauge* corrispondono alla conservazione delle varie "cariche" delle particelle, come ad esempio la carica elettrica. Le leggi di stato, infine, sono relazioni tra grandezze diverse che devono sempre valere per qualunque stato di sistema.

*stato
iniziale*



James Clerk Maxwell
(1831-1879)

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} - \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \mu_0 \vec{j}$$



Isaac Newton
(1642-1727)

$$F = G \frac{m m'}{r^2}$$

Albert Einstein
(1879-1955)

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$



Ludwig Boltzmann
(1844-1906)

$$E = kT$$

$$S = k \log W$$



Werner Heisenberg
(1901-1976)

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$$



Albert Einstein
(1879-1955)

$$E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$$

leggi di stato

principi di simmetria

*simmetrie
spazio-temporali*

*simmetrie
di gauge*

*leggi di
conservazione*
energia
quantità di moto
momento angolare
carica elettrica
...



Erwin Schrödinger
(1887-1961)

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = H\psi$$

leggi di evoluzione

Paul Dirac
(1902-1984)

$$(i\gamma^\mu \partial_\mu - m)\psi = 0$$

Abdus Salam
(1926-1996)

Sheldon Lee Glashow
(1932-in vita)

Steven Weinberg
(1933-in vita)



$$L = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + i\bar{\psi} \not{D} \psi + \text{h.c.} + \psi_i y_{ij} \psi_j \Phi + \text{h.c.} + |D_\mu \Phi|^2 - V(\Phi)$$

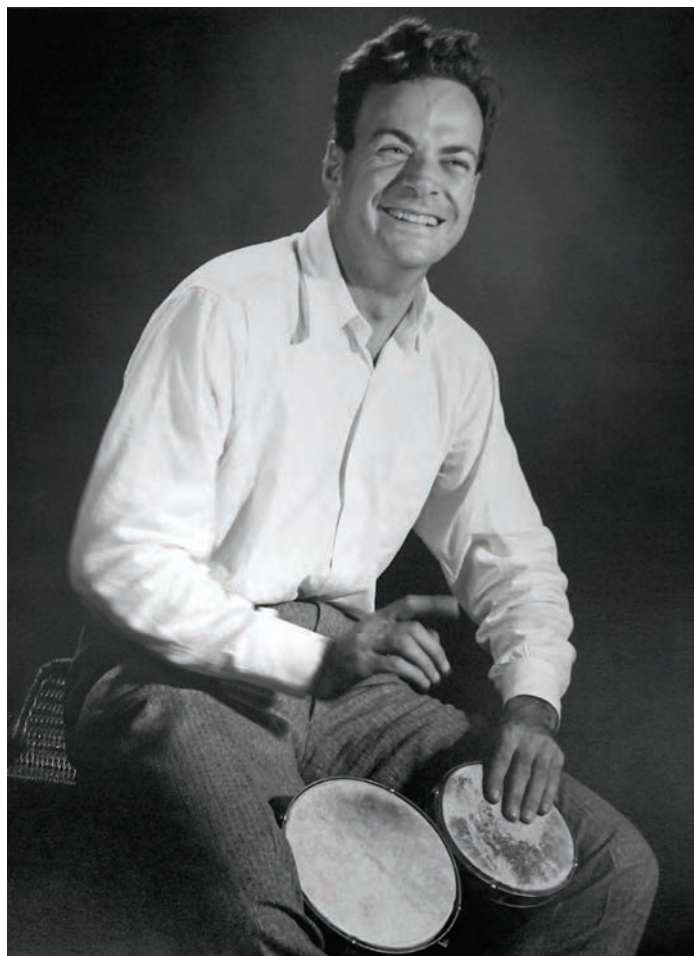
*stato
finale*

Già le ricerche di Michael Faraday, Georg Ohm, André-Marie Ampère e molti altri avevano provveduto a rimpolpare la fenomenologia dell'elettromagnetismo, ma fu Maxwell a scrivere le equazioni definitive del campo elettrico e del campo magnetico (vd. p. 12). In particolare, egli capì che l'aggiunta di un termine correttivo (la cosiddetta *corrente di spostamento*, consistente nella variazione temporale del campo elettrico) alla legge di Ampère garantiva la conservazione della carica elettrica e generava l'equazione delle onde.

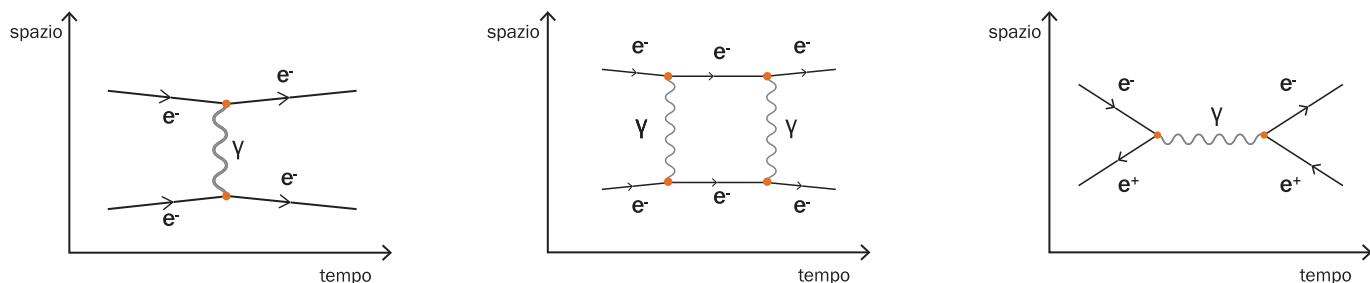
Il miracolo delle equazioni di Maxwell sta nel fatto che esse contengono i presupposti della relatività di Einstein, perché, a differenza delle equazioni della meccanica newtoniana, godono della *simmetria relativistica*, cioè sono invarianti rispetto alle trasformazioni di Lorentz dei sistemi di riferimento. Ciò può essere reso evidente introducendo un oggetto matematico chiamato *tensore* (una generalizzazione dei vettori ordinari), che incorpora il campo elettrico e il campo magnetico. Scritte in termini di tensori, le equazioni di Maxwell assumono una forma particolarmente compatta e soprattutto simmetrica a colpo d'occhio.

Dopo la fisica newtoniana dei corpuscoli e delle forze a distanza e la fisica maxwelliana dei campi, nella seconda metà del '900 si realizza la grande sintesi: le particelle e le forze sono entrambe descritte da campi *quantizzati*. Nasce l'*elettrodinamica quantistica* (Qed), la teoria degli elettroni e dei fotoni. Uno dei

protagonisti di questa svolta è Richard Feynman, il quale pubblica nel 1948 un lavoro che produrrà una sorta di insospettabile riconciliazione tra il vecchio e il nuovo: una riformulazione della teoria quantistica diversa da quella di Werner Heisenberg e da quella di Erwin Schrödinger, e basata su un principio della meccanica classica, il *principio di minima azione*. Questo principio stabilisce che la traiettoria di un corpo è quella che rende minima una quantità chiamata *azione*, che possiamo immaginare – semplificando un po' – come il prodotto dell'energia del corpo per la durata del moto. Nella meccanica classica, il principio di minima azione permette di derivare l'equazione del moto di un corpo, una volta che siano note le sue interazioni. Feynman mostra che in meccanica quantistica la probabilità che una particella si “propaghi” da un punto a un altro dello spaziotempo si può calcolare sommando tutti i possibili cammini della particella tra i due punti, con un opportuno peso per ogni cammino, dipendente dall'azione. Questo approccio, applicato alla teoria quantistica dei campi, condusse a una specie di “fisica a fumetti”, ovvero a una rappresentazione dei processi elementari e delle loro equazioni mediante figure, chiamate *diagrammi di Feynman*, che interpretano tali processi ordinandoli secondo un numero crescente di *mediatori* dell'interazione (nel caso della elettrodinamica quantistica, i fotoni, cioè le particelle della luce, vd. anche p. 13, ndr).



c.
Un giovane e brillante Richard Feynman, famoso anche per la sua passione per i bonghi.



In fig. d (a sinistra e al centro) è rappresentato l'urto di due elettroni con scambio di un fotone e di due fotoni. Si tratta in entrambi i casi di *fotoni virtuali*, cioè di fotoni che vivono per un brevissimo intervallo di tempo (vd. anche p. 21, ndr). La fig. d (a destra) mostra invece il diagramma dell'annichilazione elettrone-positrone in cui si produce un fotone virtuale, che si materializza poi in altre coppie di particelle cariche (ancora un elettrone e un positrone, oppure un muone positivo e un muone negativo, o altre particelle più pesanti, a seconda dell'energia disponibile). L'intensità dell'interazione elettromagnetica è espressa da una costante chiamata α (la *costante di struttura fine*, vd. anche in Asimmetrie n. 17 p. 19, ndr). Ogni diagramma di Feynman corrisponde a un'equazione proporzionale a una potenza di α , il cui esponente è dato dalla metà del numero di punti di interazione contenuti nel diagramma (i due diagrammi in fig. d sono quindi, rispettivamente, di ordine α e di ordine α^2). Per calcolare esattamente un processo reale, bisognerebbe sommare un numero infinito di diagrammi. Fortunatamente, la piccolezza di α (che è un numero inferiore a 0,01) fa sì che i pochi diagrammi degli ordini più bassi diano già un'ottima approssimazione. L'elettrodinamica quantistica è attualmente la teoria fisica più precisa: le sue predizioni si accordano con i dati sperimentali fino alla nona cifra significativa (cioè con un errore inferiore a una parte su un miliardo). Per conseguire questi successi, però, la teoria quantistica dei campi ha dovuto sconfiggere un nemico: l'infinito. Appena si considerano

diagrammi che descrivono un dato processo oltre l'ordine più basso in α , infatti, le equazioni danno valori infiniti. Il problema, in un certo senso, era presente già in fisica classica: l'energia potenziale dovuta al campo elettrico generato da un elettrone cresce man mano che ci si avvicina alla sorgente e diventa infinita nel punto in cui si trova l'elettrone stesso, che è una particella puntiforme. Nell'ambito della teoria quantistica dei campi, il problema è che il *vuoto quantistico* non è "vuoto", ma pullula di fotoni e di cariche prodotte in coppie, complessivamente neutre, di elettroni e positroni, virtuali (cioè effimeri), che vengono prodotti e riassorbiti dall'elettrone originario e producono guai alla teoria. Ma un complesso sistema di "trucchi", la cosiddetta *rinormalizzazione*, basata sulla ridefinizione dei campi e dei parametri della teoria, e ideata da Feynman, assieme a Julian Schwinger e Sin-Itiro Tomonaga, negli anni '40 del secolo scorso, permette di cancellare gli infiniti. L'esito finale è quella straordinaria capacità predittiva dell'elettrodinamica quantistica di cui abbiamo parlato. Negli anni '70, gli olandesi Gerardus 't Hooft e Martinus Veltman hanno dimostrato che la rinormalizzazione funziona anche con le teorie che descrivono le altre forze fondamentali del mondo subnucleare, quelle che compongono il *modello standard* (vd. p. 26). La storia delle leggi e delle equazioni, e dello sforzo dei fisici per calcolare il mondo, ha raggiunto così il suo temporaneo epilogo. Ci saranno sicuramente altri capitoli, ma per il momento sono ancora in bozze.

d.

A sinistra, il diagramma di Feynman che rappresenta l'urto di due elettroni, in cui si scambia solo un fotone. Le linee e^- rappresentano i due elettroni, la linea ondulata tra le due è il fotone mediatore che trasferisce energia e impulso da un elettrone all'altro. Al centro, l'urto di due elettroni con lo scambio di due fotoni. A destra, il diagramma di Feynman dell'annichilazione elettrone-positrone in un fotone virtuale. Le linee dei positroni puntano indietro nel tempo.

Biografia

Carlo Bernardini è professore emerito dell'Università Sapienza di Roma. Dopo la laurea, nel 1952, ha lavorato con Enrico Persico e Giorgio Salvini all'elettrosincrotrone da 1000 MeV dei Laboratori di Frascati dell'Infn. Nel 1960 con Bruno Touschek e altri ha dato l'avvio agli Anelli di Accumulazione materia-antimateria (Ada e Adone). È molto attivo nell'ambito della formazione degli insegnanti e della storia della fisica contemporanea. È autore di numerosi libri specialistici e divulgativi, tra i quali "Che cos'è una legge fisica" (Editori Riuniti, 1985).

Campi di luce

La grande unificazione di Maxwell

di Angelo Carbone



a.

Un arcobaleno alla fine di un temporale o il segnale trasmesso da un'antenna sono solo due delle tante manifestazioni dell'elettromagnetismo.

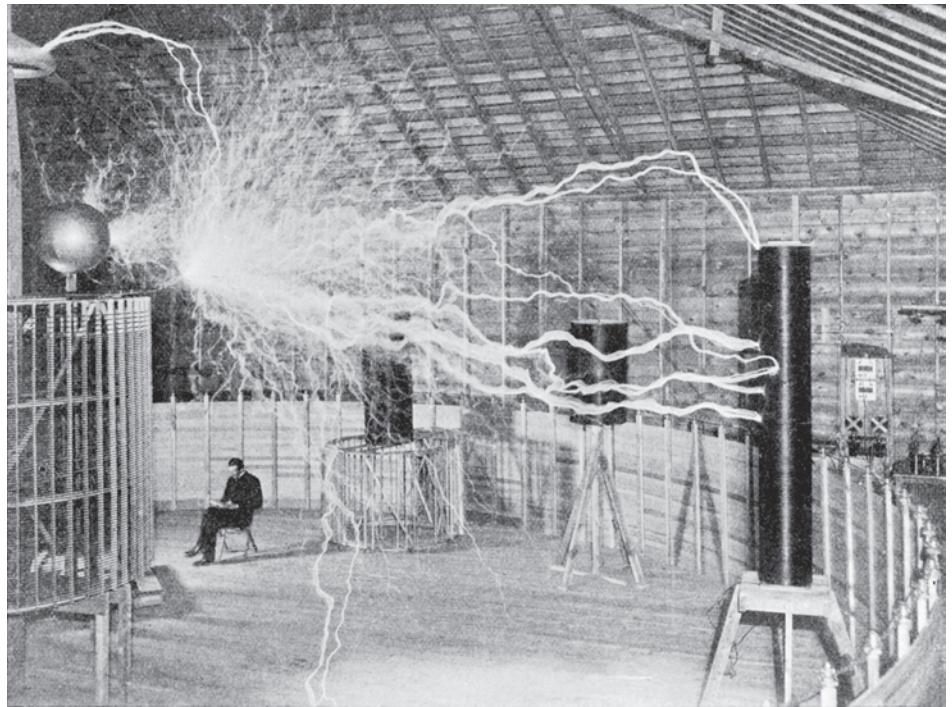
Grazie alla stretta connessione tra la fisica teorica e la fisica sperimentale nella prima metà dell'800, il grande fisico James Clerk Maxwell (1831-1879) riuscì a riassumere i fenomeni elettrici e magnetici osservati fino a quel momento in quattro equazioni differenziali, note come le equazioni di Maxwell. La teoria dell'elettromagnetismo che ne consegue, oltre a costituire uno dei pilastri della fisica moderna, è il primo esempio di unificazione di fenomeni solo apparentemente diversi, dando luogo a uno dei più importanti risultati scientifici di tutti i tempi: la scoperta delle onde elettromagnetiche. Esse non solo esistono in natura, ma si possono propagare nel vuoto, in mezzi come

l'atmosfera e nelle guide ottiche. Quando l'uomo comprese la possibilità di trasportare energia e quindi "informazione" da un punto all'altro dello spazio, diede origine a una seconda rivoluzione dopo quella industriale, la "rivoluzione tecnologica". Grazie a queste scoperte l'uomo ha potuto inventare oggetti che si basano sulle onde elettromagnetiche e che ormai appartengono alla nostra vita quotidiana, come ad esempio la radio, la televisione, il forno a microonde e i telefoni cellulari. Ma facciamo un salto indietro nel tempo, al periodo precedente ai lavori scientifici di Maxwell. Il primo protagonista a entrare nella nostra storia è Isaac Newton (1642-1727). Per

primo Newton riuscì a spiegare il moto dei pianeti, formulando la legge gravitazionale universale: due corpi si attraggono con una forza, quella gravitazionale, la cui intensità è proporzionale alla quantità di materia contenuta nelle loro masse e inversamente proporzionale alla loro distanza (vd. p. 5, ndr). Ed è proprio sulla base degli studi di Newton che Charles Coulomb (1736-1806), grazie a un dispositivo da lui inventato, scoprì che due corpi carichi esercitano l'uno sull'altro una forza la cui intensità è proporzionale alla carica e inversamente proporzionale al quadrato della distanza, analogamente a quanto succede nel caso della forza gravitazionale. Nel caso

b.

Nikola Tesla, ingegnere elettrico, inventore e fisico serbo naturalizzato statunitense, è conosciuto per i numerosi contributi nel campo dell'elettromagnetismo tra la fine dell'800 e gli inizi del '900. L'unità di misura dell'intensità del campo magnetico porta il suo nome. In questa foto realizzata a scopi pubblicitari, Tesla è ripreso mentre produce "luce" artificiale nel suo laboratorio di Colorado Springs.



gravitazionale, la "carica" (la massa) è solo positiva, mentre nel caso della forza elettrica la "carica" (la carica elettrica) è sia positiva sia negativa. In questo modo, a differenza della forza gravitazionale, che è unicamente attrattiva, la forza elettrica è sia attrattiva sia repulsiva.

L'episodio successivo, che cambiò definitivamente la storia dell'elettromagnetismo, ebbe luogo in un'aula universitaria a Copenaghen, in Danimarca. Il professor Hans Christian Oersted (1777-1851), mentre mostrava ai suoi studenti che la corrente prodotta dalla pila di Volta era in grado di scaldare un filo attraversato da corrente elettrica, si accorse che il flusso stesso delle cariche elettriche (la corrente) causava il movimento degli aghi delle bussole poste in prossimità delle cariche. Egli concluse che la corrente elettrica genera anche un campo magnetico. Fu così che si scoprì che la carica elettrica e il magnetismo, noti a quei tempi come fenomeni indipendenti, in realtà erano strettamente legati fra loro. Successivamente, André-Marie Ampère (1775-1836) completò le ricerche sul magnetismo e lo studiò come

Coulomb fece con l'elettricità, formulando l'equazione matematica che descrive gli effetti magnetici prodotti dalle correnti elettriche.

Mancava solo un'ultima intuizione per completare il quadro sperimentale dell'elettromagnetismo, quella che poi portò alla seconda rivoluzione industriale. Ad averla fu Michael Faraday (1791-1867) che sulla base degli studi di Oersted concluse, verificandolo sperimentalmente, che se l'elettricità può produrre il magnetismo, anche il magnetismo può produrre elettricità. Questa incredibile scoperta, l'induzione elettromagnetica, mise le basi per lo sviluppo di tutte quelle applicazioni che permettono di trasformare energia meccanica in energia elettrica, come avviene per esempio nella dinamo di una bicicletta.

Ma come è possibile che due corpi distanti tra loro, come due cariche elettriche, interagiscano senza toccarsi? A questa domanda oggi i fisici rispondono riferendosi all'esistenza di un *campo gravitazionale*, un *campo elettrico* e dei mediatori delle forze. Fu proprio Faraday che per primo introdusse

il concetto di campo: il Sole influenza il movimento della Terra producendo un campo gravitazionale in ogni punto dello spazio ed è il campo stesso responsabile del movimento della Terra e non il Sole. Analogamente un oggetto carico produce un campo elettrico in ogni punto dello spazio, mediante particelle chiamate mediatori, che propagando le informazioni del campo elettrico nello spazio, interagiscono con le altre cariche elettriche. Nel caso dell'elettromagnetismo i mediatori sono i fotoni.

Sono stati quindi Newton, Coulomb, Oersted, Ampère e Faraday, insieme a tanti altri importanti fisici, a gettare le fondamenta della teoria della forza elettromagnetica, ma Maxwell, uno dei più importanti scienziati mai vissuti, ne fu il vero padre. Utilizzando il potente strumento della matematica, mise insieme tutti i risultati sperimentali ottenuti sotto forma di quattro equazioni differenziali, esprimendo in questo modo tutte le leggi empiriche elaborate nei decenni precedenti e unificando in un'unica teoria l'elettricità e il magnetismo (vd. approfondimento).

Le equazioni di Maxwell in quattro parole



A scrivere per primo le equazioni di Maxwell nella forma in cui le conosciamo oggi fu l'ingegnere e fisico britannico Oliver Heaviside, tra l'800 e il '900 (Maxwell le aveva espresse in modo diverso). I campi elettrico e magnetico sono indicati rispettivamente con $\vec{E}$ e con $\vec{B}$, e sono vettori a tre componenti (nelle tre direzioni perpendicolari dello spazio). Le altre quantità presenti sono la densità di carica ρ (la carica per unità di volume) e la densità di corrente $\vec{j}$ (la corrente che passa nell'unità di tempo attraverso una superficie unitaria). I coefficienti ϵ e μ compaiono a causa del sistema di unità di misura che è stato scelto (il cosiddetto *Sistema Internazionale*) e, combinati assieme, danno la velocità della luce nel vuoto. Quanto agli strani simboli che compaiono nelle formule, i triangoli capovolti contengono le derivate spaziali, cioè le variazioni istantanee dei campi rispetto alle coordinate x, y, z , mentre il simbolo $\partial/\partial t$ rappresenta la derivata temporale, cioè la variazione istantanea nel tempo.

La prima equazione di Maxwell lega il campo elettrico alle sue sorgenti, le cariche. È l'equazione fondamentale dell'elettrostatica e permette, in linea di principio, di calcolare il campo elettrico a partire da una qualunque distribuzione fissa di carica.

La seconda equazione di Maxwell è simile alla prima, ma con una differenza cruciale: al secondo membro non ci sono le cariche magnetiche. Questa equazione descrive un fatto sperimentale importante, e cioè che in natura non

esistono sorgenti di campo magnetico costituite solo da un polo "nord" o da un polo "sud". I poli magnetici si manifestano sempre insieme. Per esempio, se tagliamo a metà una calamita fatta di polo "nord" e "sud", essa si dividerà in due calamite, ciascuna delle quali avrà sempre un polo nord e un polo sud.

La terza equazione di Maxwell stabilisce che la variazione nel tempo di un campo magnetico induce un campo elettrico e, quindi, in presenza di cariche, una corrente elettrica. È l'equazione che descrive il fenomeno dell'*induzione elettromagnetica* scoperto da Faraday e ha importanti conseguenze applicative: nelle centrali elettriche, per esempio, si trasformano movimenti meccanici (che producono variazioni del flusso del campo magnetico nei circuiti) in elettricità, basandosi proprio su questa legge.

La quarta equazione di Maxwell completa il quadro teorico dell'elettromagnetismo: mostra che un campo magnetico può essere generato da una corrente, ma anche da una variazione del campo elettrico. Il termine contenente la derivata temporale del campo elettrico fu introdotto da Maxwell per poter descrivere i fenomeni variabili nel tempo e garantire la legge di conservazione della carica elettrica che altrimenti sarebbe stata violata. Si noti che questo termine rende anche più simmetrica la presenza del campo elettrico e del campo magnetico nelle quattro equazioni.

Maxwell fornì un inquadramento teorico completo di una grande mole di dati sperimentali. Una valida teoria non solo si adatta bene ai dati sperimentali osservati, ma ha anche il potenziale di poter realizzare grandi scoperte. La teoria dell'elettromagnetismo permise a Maxwell non solo di descrivere in maniera elegante l'elettricità, il magnetismo e la loro relazione, ma anche di predire

l'esistenza delle onde elettromagnetiche. Di queste onde Maxwell riuscì a dedurre per via teorica la velocità e scoprì che era identica alla velocità della luce, da poco misurata con grande precisione. Egli dedusse quindi che la luce è un fenomeno elettromagnetico. Si scoprì poi in seguito che la luce è formata da fotoni, che sono, appunto, i mediatori della forza elettromagnetica.

L'idea di una sostanziale unità delle forze della natura, viva nella discussione filosofica di quel periodo storico, trova quindi una realizzazione nei lavori di Maxwell. Questo percorso da lui intrapreso non si arrestò.

Gli studi successivi più recenti permisero di scoprire due altre forze in aggiunta a quella gravitazionale e a quella elettromagnetica: la forza *debole* e la forza *forte*.

E così, la storia si ripeté e, circa cent'anni dopo il lavoro di Maxwell, i fisici teorici, in particolare Steven Weinberg (1933-), Abdus Salam (1926-1996) e Sheldon Lee Glashow (1932-), elaborarono teorie che permisero di collegare l'elettromagnetismo, presente nella struttura di tutta la materia, con la forza debole, responsabile dei decadimenti radioattivi e normalmente nascosta all'interno di nuclei atomici (vd. p. 26, ndr). Essi teorizzarono che l'elettromagnetismo e la forza debole fossero unificati in un'unica forza, quella *elettrodebole*. La scoperta delle particelle $W^\pm$ e Z^0 (avvenuta al Cern nel 1983 da parte dell'italiano Carlo Rubbia e i suoi colleghi), i mediatori della

forza debole, ne diedero la conferma sperimentale definitiva. Esistono indicazioni sperimentali anche del fatto che la forza forte a scale di energia sempre più elevate si "indebolisce", lasciando presagire la possibile unificazione della forza forte con quella elettrodebole (come teorizzato nella Gut, *grand unified theory*, vd. in Asimmetrie n. 18 p. 7, ndr).

Oggi i fisici di tutto il mondo sono alla ricerca di una prova indiretta della Gut a scale di energia più bassa, per esempio nell'acceleratore Lhc (Large Hadron Collider) del Cern, cercando particelle nuove chiamate *supersimmetriche* (vd. in Asimmetrie n. 18 p. 13, ndr) predette da questi modelli teorici di unificazione delle forze.

Facendo un passo ancora in avanti, i fisici teorici prevedono anche la possibilità di includere la gravità nell'unificazione a una scala di energia ancora più alta. Questa "forza unificata" avrebbe governato i primi istanti dell'universo dopo il Big Bang manifestandosi poi nelle quattro forze durante la fase di raffreddamento.

c.
La scoperta del bosone di Higgs nel 2012, come anche la ricerca di particelle supersimmetriche che i fisici sperano di trovare analizzando i dati raccolti in questi mesi da Lhc, non sarebbe possibile senza il contributo "classico" dell'elettromagnetismo, per esempio quello che descrive la traiettoria curva di una carica che attraversa un dipolo (nella foto è visibile un modello di uno dei 1232 dipoli superconduttori disposti lungo i 27 km di Lhc).



Biografia

Angelo Carbone è ricercatore presso l'Università di Bologna e docente di elettromagnetismo presso il corso di laurea in Ingegneria Energetica. Svolge la sua attività di ricerca in collaborazione con l'Infn presso il Cern, dove si occupa di cercare prove indirette dell'esistenza di particelle supersimmetriche con l'esperimento Lhcb.

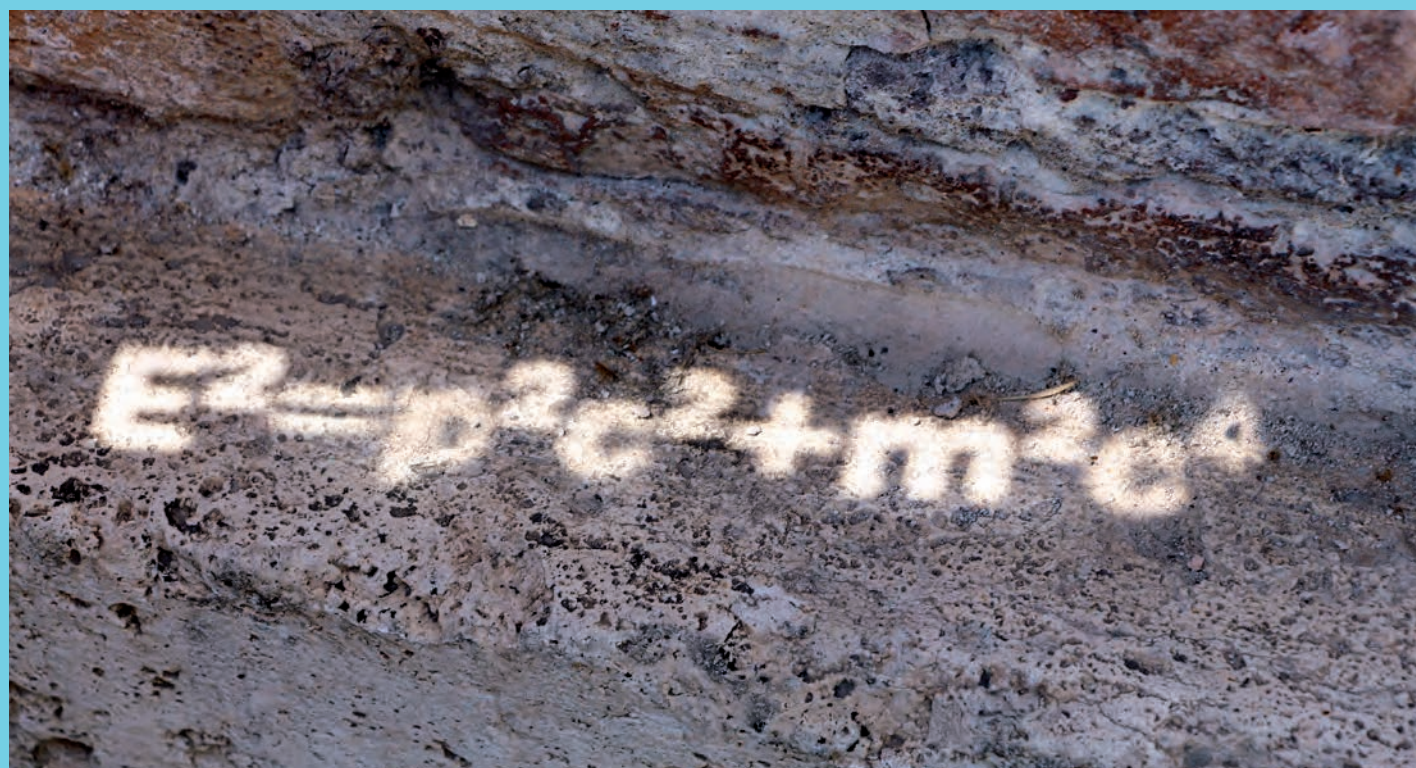
Creare materia

Produzione di particelle grazie alla relatività speciale

di Tommaso Spadaro

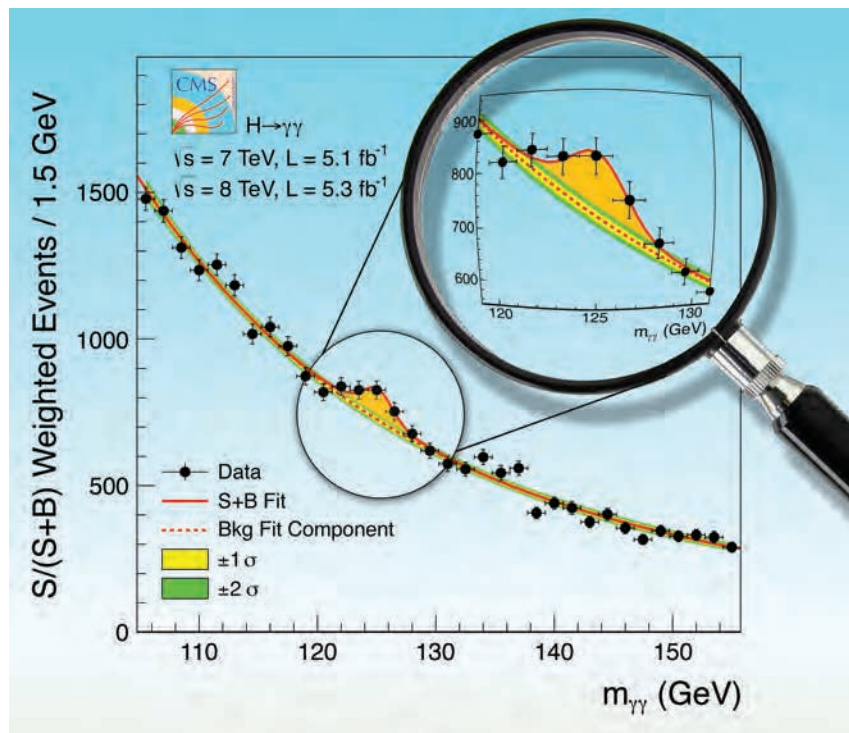
Uno degli obiettivi più ambiziosi della fisica delle particelle è la creazione e la scoperta di particelle “non previste” nel modello di fisica più “assodato” e verificato, perciò detto “standard”. Pur descrivendo con grande precisione la quasi totalità dei fenomeni osservati, il modello standard lascia inevase domande fondamentali che le osservazioni sperimentali suscitano: per esempio, qual è il meccanismo che ha creato l’asimmetria osservata tra materia e antimateria nell’universo; quale natura ha la materia “oscura”, i cui effetti gravitazionali sono stati osservati; da quale meccanismo sottostante derivano le enormi differenze di massa tra le particelle elementari che conosciamo, e così via.

Per farlo, i fisici delle particelle utilizzano le conseguenze sperimentali dell’equazione della relatività speciale, formulata da Albert Einstein nel 1905. In essa (vd. foto), E rappresenta l’energia di una o più particelle, p la loro quantità di moto complessivo (dove, in meccanica classica, la quantità di moto di un corpo è data dal prodotto di velocità e massa), m è la massa del sistema, infine, c è la velocità della luce. Cosa significa in realtà? La risposta dipende dal sistema considerato. Nel caso di una singola particella a riposo, ad esempio, p è nulla e l’equazione stabilisce l’uguaglianza tra massa a riposo ed energia, espressa nella famosa equazione $E = mc^2$. Questa è già una relazione ricchissima di significato:



a.

Immagine apparsa sulla copertina dell'edizione speciale della rivista Physics Letters B, che raccoglieva i due articoli delle collaborazioni Atlas e Cms sulla scoperta del bosone di Higgs. La figura riporta la distribuzione della "massa invariante" di due fotoni, negli eventi registrati dall'esperimento Cms al Lhc del Cern. La massa invariante è data dalla radice quadrata della differenza tra il quadrato della somma delle energie e il quadrato del modulo della somma vettoriale delle quantità di moto dei due fotoni. Il picco evidenziato dalla lente di ingrandimento è il contributo dovuto al bosone di Higgs.



in relatività, ogni corpo dotato di massa ha un'energia intrinseca. Di converso, si può trasformare l'energia in massa. Per trovare nuove particelle, i fisici cercano di fornire delle risposte con esperimenti di laboratorio: l'idea è di accelerare le particelle facendole interagire a energie sempre più elevate, al fine di produrre, nello stato finale del sistema, nuove e più pesanti particelle, trasformando quindi l'energia "cinetica" delle particelle interagenti in massa, come descritto nell'equazione della relatività speciale.

È così che i fisici sono riusciti a produrre in laboratorio, già a partire dagli anni '60, particelle "leggere" come i muoni e i pioni, che si potevano rivelare direttamente solo come prodotto delle interazioni dei raggi cosmici con l'atmosfera (vd. Asimmetrie n. 10, ndr). Al crescere delle energie delle macchine acceleratrici (vd. in Asimmetrie n. 18 p. 19, ndr) si è arrivati alla fine del secolo scorso a produrre e identificare anche il più "pesante" dei quark, il top, che ha massa di circa 170 GeV, pari a 180 volte la massa del protone.

La presenza di queste particelle potrebbe essere però "effimera": appena create, esse potrebbero decadere, trasformandosi in particelle stabili. Anche in questo caso la nostra equazione di conservazione di massa/energia ci aiuta a individuarle: misurando l'energia e, separatamente, la quantità di moto complessiva dei prodotti di decadimento, si può valutare la differenza tra E^2 e p^2c^2 in un gran numero di interazioni e misurare, così, la massa del sistema. Se,

considerando gli errori di misura, essa ricorre con maggiore frequenza intorno a uno stesso valore, si potrebbe trattare di una nuova singola particella. La massa di questa particella è data dal valore del picco osservato. È seguendo questa strada, che i fisici degli esperimenti Atlas e Cms nel 2012 hanno individuato il bosone di Higgs. Come hanno fatto a scoprirlo? Tra i moltissimi "eventi" di interazione tra due fasci di protoni dell'acceleratore Lhc a un'energia complessiva di 7-8 TeV, ne avevano selezionati alcuni nel cui stato finale erano presenti due fotoni emessi in coincidenza temporale. Il picco mostrato in fig. a si riferisce a quella piccola frazione di casi in cui i due fotoni sono proprio il risultato del decadimento di una singola nuova particella. Si tratta del risultato di vent'anni di ricerca e sviluppo di migliaia di ricercatori.

In che modo si fanno interagire le particelle? Una tecnica comune consiste nell'accelerare particelle cariche tramite campi elettrici, confinarle in una traiettoria stabilita tramite campi magnetici, per scagliarle infine verso un bersaglio in quiete (approccio a *fixed target*, cioè a bersaglio fisso). Possiamo considerare le particelle come dei proiettili. Esse si comportano come delle onde: maggiore è la loro energia, più corta è la lunghezza che riescono a "mettere a fuoco" mentre procedono nel bersaglio. Se entro questa distanza si trova un elemento in grado di interagire, ci sarà un'interazione. Se l'elemento sensibile del bersaglio sia un atomo, un elettrone, un protone, un neutrone, un quark, ecc., dipende dall'energia

considerata e dalla distanza caratteristica della forza di interazione. Talvolta, in questo processo, sia il proiettile che l'elemento sensibile del bersaglio possono cambiare il proprio stato e trasformarsi in altri elementi o persino annichilirsi. La varietà e complessità delle possibilità è notevole. Un punto fermo però rimane: la differenza di E^2 e p^2c^2 è invariante. Essa cioè rappresenta la massa complessiva disponibile a seguito dell'interazione. Spesso la quantità di moto del proiettile è molto maggiore della sua massa a riposo. In questo caso, la massa invariante complessiva è proporzionale alla radice della quantità di moto del proiettile e questa è una conseguenza fisica "scoraggiante": ad esempio, la fatica (e il costo) profusi per aumentare la quantità di moto del proiettile del 100%, porta a un misero aumento del 40% della massa invariante disponibile.

Per sfruttare pienamente l'energia disponibile, nell'approccio alternativo si prevede di accelerare due insiemi distinti di proiettili, facendoli scontrare l'uno contro l'altro in direzioni opposte. In questo caso, la macchina è detta *collisore*, la quantità di moto netta del sistema è zero (quantità di moto

uguali in modulo e opposti in direzione) e l'equazione predice che l'energia totale, pari alla somma delle energie dei due proiettili, può trasformarsi interamente in massa a seguito dell'interazione: un raddoppio delle energie dei proiettili conduce a un raddoppio della massa invariante disponibile. La complessità di questo secondo approccio è però notevole: nella configurazione a *fixed target* il bersaglio in quiete è un oggetto macroscopico e la molteplicità di elementi sensibili in esso contenuti è dell'ordine del numero di Avogadro. In un collisore occorre "muovere" un numero estremamente grande di proiettili per ottenere un numero di interazioni confrontabile. Occorre inoltre che le traiettorie dei fasci collidenti siano accuratamente controllate, affinché non sia troppo esigua la possibilità di far passare due proiettili sufficientemente vicini da interagire tra loro. Sfide come queste sono tecnologicamente molto ardue.

Per questo motivo, di solito occorre un'intera generazione umana per ottenere un aumento consistente dell'energia disponibile. Non sorprende quindi l'entusiasmo dei fisici in alcuni di questi rari momenti pionieristici (vd. fig. b).



b.
Il 3 giugno scorso Lhc riprende a fare fisica a un'energia record di 13 TeV.

Biografia

Tommaso Spadaro è un ricercatore dei Laboratori Nazionali di Frascati e coordinatore delle attività locali di fisica delle particelle. Nella prima parte della sua carriera ha svolto molteplici analisi dei dati dell'esperimento Kloe, operante al collisore Dafne. Da alcuni anni collabora all'esperimento a bersaglio fisso Na62, operante al super proto-sincrotrone Sps del Cern.

Un mondo indeterminato

Le relazioni di Heisenberg

di Antonio Davide Polosa



“Se credete di aver capito la teoria dei quanti, vuol dire che non l’avete capita”, disse Feynman durante un’intervista riferendosi alla meccanica quantistica che, sviluppata verso la fine degli anni ’20 del secolo scorso, sancisce una radicale rottura rispetto alle leggi della meccanica classica. Il principio di indeterminazione ne è uno dei cardini e mette in discussione il concetto stesso di misura di una grandezza fisica.

Il fine di una teoria fisica è quello di fornire predizioni quantitative sui risultati di nuovi esperimenti in base a quanto osservato e misurato in esperimenti precedenti. Quando si effettuano delle misure su un sistema fisico, si agisce sullo stato in cui il sistema si trovava prima che lo si misurasse e se ne determina lo stato successivo. L’esperienza porterebbe a pensare che non vi sia alcuna distinzione fra questi due momenti: se misuriamo la lunghezza di un tavolo con un metro è noto che la lunghezza del tavolo non verrà alterata in conseguenza dell’uso che facciamo del metro. Tuttavia, quando si misurano grandezze relative a una particella, per esempio un elettrone, le cose vanno diversamente. Supponiamo di volerne misurare la posizione: dove si trova l’elettrone a un dato istante

di tempo? Si può usare della luce per illuminarlo e, dalla luce diffusa, risalire alla sua posizione. Supponiamo di ricavare la posizione in modo molto preciso, ovvero con un’incertezza molto piccola sulle coordinate spaziali. Tanto più è grande la precisione ottenuta sulle coordinate, tanto più l’interazione con la luce deve aver alterato lo stato di moto dell’elettrone, al punto che, nello stesso istante di tempo in cui prendiamo nota delle coordinate, non possiamo dire nulla di preciso sulla sua quantità di moto.

Quindi, l’atto della misura permette di risalire alla posizione, ma causa un cambiamento nello stato di moto dell’elettrone in un modo che, in linea di principio, è impossibile determinare. Al contrario, se si sa tutto della quantità di moto, si perde ogni precisione sulla posizione. Questo è il contenuto del principio di indeterminazione (o *relazione di indeterminazione fra posizione e quantità di moto*) formulato da Werner Heisenberg nel 1927, già implicito in un suo lavoro di due anni prima e conseguenza naturale delle ipotesi alla base della meccanica ondulatoria. In termini matematici, il prodotto delle incertezze su posizione (Δx) e quantità di moto (Δp) è dell’ordine della costante di Planck $\hbar$ (vd. la disuguaglianza a destra nella foto).



a.
Werner Heisenberg, il padre delle
relazioni di indeterminazione.

Vi è un'altra fondamentale relazione di indeterminazione nella teoria dei quanti, che va sotto il nome di *relazione di indeterminazione tempo-energia*, riguardante la misura dell'energia effettuata con un qualche apparato. L'apparato di misura e il sistema fisico (per esempio, l'elettrone) vengono messi a contatto (*in interazione*) a un certo istante di tempo. Supponendo che la somma delle energie dell'apparato di misura e dell'elettrone sia misurabile con assoluta precisione, si effettua la stessa misura a un istante di tempo successivo. Si trova così che la conservazione dell'energia, valida sempre in fisica classica (vd. approfondimento a p. 7, ndr), nella fisica quantistica può essere verificata solo entro un certo livello di accuratezza. Più precisamente, risulta che il valore più probabile della differenza fra l'energia iniziale e l'energia finale (ΔE) è proporzionale al rapporto tra $\hbar$ e l'intervallo di tempo trascorso tra una misura e quella successiva (vd. la disuguaglianza a sinistra nella foto a p. 19). Quindi anche il prodotto fra ΔE e Δt è dell'ordine della costante di Planck. Nel caso di una particella instabile, la relazione di indeterminazione tempo-energia ha una implicazione rilevante sulla misura della massa della particella. Se la vita media di questa particella è molto breve, non c'è tempo sufficiente per misurarne direttamente la massa, che può tuttavia essere determinata sommando l'energia di tutte le particelle prodotte nel decadimento.

Anche se si potesse misurare con altissima precisione l'energia di tutte le particelle prodotte nel decadimento, poiché la misura avviene entro un tempo dell'ordine della vita media della particella, essa non corrisponderebbe esattamente alla massa originale. Il valore della massa della particella di partenza è dato da una distribuzione di probabilità a forma di campana (detta *curva di risonanza*) tanto più larga, quanto più breve è la vita media della particella. Una delle conseguenze del principio di indeterminazione a cui si fa spesso riferimento è che ogni processo di misura va ad alterare la grandezza che si vuole misurare, per cui questa misura non può essere riproducibile. Questo punto fu sviluppato nel 1928 da Niels Bohr. Se si cerca di misurare con un esperimento ideale, ma concettualmente "completo", la quantità di moto di una particella con una certa precisione, è inevitabile variare la velocità (e quindi la stessa quantità di moto) di una quantità che è tanto maggiore quanto più piccola è la durata del processo di misura e quanto maggiore è la precisione sulla quantità di moto che si vuole ottenere: il processo di misura modifica la grandezza che viene misurata! Se la variazione della velocità della particella potesse essere grande a piacimento, si riuscirebbe comunque, a un dato istante, a conoscere la quantità di moto con una precisione arbitrariamente piccola. Tuttavia, quando si esplorano fenomeni fisici in cui bisogna tenere conto della relatività



b.
Bohr e Landau intenti in una conversazione nell'Istituto per i Problemi Fisici dell'Accademia delle Scienze russa, a Mosca, negli anni '60.

speciale, come fu osservato da Lev Landau e Rudolf Peierls già nel 1931, questo non è più vero: per la relatività speciale c'è un limite per la variazione della velocità dato dalla velocità della luce (che è circa 300.000 km/s) e quindi la quantità di moto non è comunque misurabile con una precisione arbitrariamente piccola. Qualcosa di analogo succede, se si vuole misurare la posizione con una precisione arbitraria: neanche la posizione è misurabile con una precisione arbitrariamente piccola. Infine, portiamo alle estreme conseguenze i ragionamenti sulla relazione tempo-energia. Un elettrone libero non può emettere un fotone, per via della conservazione dell'energia, dato che inizialmente l'energia dell'elettrone corrisponde alla sua massa, mentre nello stato finale ad essa si deve sommare anche l'energia del fotone. Tuttavia, la teoria dei quanti permette l'esistenza temporanea di stati, come il fotone emesso, in violazione (temporanea) della conservazione dell'energia. Un processo che avviene esclusivamente per via di una violazione temporanea della conservazione dell'energia viene chiamato *virtuale*. Se non ci fossero altri elettroni vicini, il fotone emesso sarebbe riassorbito rapidamente dall'elettrone emettitore. D'altra parte, se effettuassimo delle misure su un singolo elettrone, non saremmo in grado di dire se ha emesso e assorbito o meno uno o più fotoni. Questo vuol dire che la massa che

osserviamo sperimentalmente non può essere la massa "nuda" (quella di un elettrone spogliato di tutti i processi virtuali), che resta quindi un parametro inaccessibile sperimentalmente.

Se vicino all'elettrone emettitore vi fosse invece un altro elettrone, il fotone emesso da uno potrebbe essere immediatamente riassorbito dall'altro, mettendo a posto, complessivamente, il bilancio energetico. Questo scambio è alla base della descrizione quantistica dell'interazione fra due elettroni. Tuttavia il fotone virtuale, scambiato fra i due elettroni, potrebbe trasformarsi temporaneamente in una coppia elettrone-antielettrone. Questo tipo di processo virtuale porta a concludere che anche la carica elettrica "nuda", come la massa, non è una quantità sperimentalmente accessibile. Negli anni, si è imparato a calcolare e misurare le conseguenze dei processi virtuali che sono alla base della conoscenza della fisica dei processi elementari.

Biografia

Antonio Davide Polosa è professore presso la Sapienza, Università di Roma. È stato ricercatore Infn a Roma dal 2005 al 2010 e precedentemente *post-doc* al Cern, al Lapp-Th di Anncy e all'Università di Helsinki.

Un mare di antimateria

L'equazione di Dirac, dalla meccanica quantistica al modello standard

di Graziano Venanzoni



a.
Lapide commemorativa di Paul Dirac, inaugurata il 13 novembre 1995 in una navata dell'Abbazia di Westminster (Londra), vicina al monumento dedicato a Newton.

Paul Adrien Maurice Dirac fu senza dubbio uno fra i massimi fisici di tutti i tempi. Dal 1926 al 1928, in tre articoli, gettò le basi della meccanica quantistica, della teoria quantistica dei campi (che poi portò alla formulazione dell'elettrodinamica quantistica, QED, la prima teoria quantistica dei campi che conciliava la meccanica quantistica e la relatività) e infine – con l'equazione che

porta il suo nome – della moderna teoria delle particelle elementari (nota anche come modello standard).

La famosa equazione di Dirac per l'elettrone apparve nel 1928. È difficile non provare ammirazione di fronte alla bellezza di una tale equazione. Conciliando la meccanica quantistica e la relatività di Einstein, introduceva un nuovo formalismo a quattro componenti

(detti *spinori*) che andava al di là del concetto di tensore. Permettendo di descrivere il moto dell'elettrone libero, ma anche di entità composite libere come protoni e neutroni, prevedeva un moto di "rotazione" intrinseco dell'elettrone, il cosiddetto *spin*, con valori quantizzati seminteri (oggi diciamo che l'*elicità* dell'elettrone, ossia la componente dello spin lungo la direzione

di moto, può prendere solo due valori, $+1/2$ o $-1/2$), associato a un *momento magnetico*, che permetteva di spiegare alcuni aspetti “misteriosi” degli spettri atomici, di cui parleremo tra poco. Ma poneva anche un problema nuovo: quello delle energie negative.

Infatti, se si risolve l'equazione di Dirac per un singolo elettrone, si ottengono due soluzioni, una positiva e una negativa, allo stesso modo per cui la radice quadrata di 49 è +7 e -7. La soluzione negativa era preoccupante: l'energia negativa, che era in sé un'idea imbarazzante, implicava, per la famosa equazione della relatività speciale di Einstein $E = mc^2$ (vd. p. 16, ndr), una massa negativa: una cosa chiaramente assurda! All'epoca, ovviamente nessuno aveva mai visto questi oggetti con energia negativa. Si racconta che un teorico li chiamò “elettroni asini”: “se li tiri in avanti, si muovono all'indietro”! Capita spesso nell'ambito della ricerca scientifica che la soluzione di un problema ne faccia emergere uno nuovo, completamente inaspettato, la cui soluzione rappresenta un progresso significativo della conoscenza. Capì così anche a Dirac, che lottò con le

energie negative per l'intero 1929, finché non giunse alla conclusione che esse non potevano essere evitate. La spiegazione che diede era che gli stati a energia negativa non si vedono, perché occupano lo stato di minima energia possibile che è lo stato di vuoto. Gli elettroni a energia positiva non possono cadere in questo mare senza fondo, perché non vi è spazio per loro. Però può succedere, così come ogni tanto un pesce salta fuori dall'acqua, che un elettrone presente in questo mare, investito da un fascio di luce, possa saltar fuori, acquistando un'energia positiva e lasciando una buca nella posizione originaria. Questa buca apparirebbe come una sorta di elettrone “opposto”: stessa massa, ma con carica positiva (corrispondente a un'assenza di carica negativa) ed energia positiva. Fu così che l'equazione di Dirac prediceva un nuovo tipo di materia: l'*antimateria*, del tutto simile alla materia ma con carica opposta (occorre dire, però, che per un bel po' di tempo Dirac fu riluttante ad accettare la predizione dell'esistenza di un antielettrone, a tal punto da identificarlo con il protone). Qualche anno più tardi l'antielettrone

(chiamato *positrone*) fu scoperto da Carl D. Anderson nei raggi cosmici, scoperta che gli valse il premio Nobel per la fisica del 1936. Fu un vero trionfo per l'equazione di Dirac. “L'equazione – egli disse in seguito – era stata più intelligente di me”. Ma il trionfo sperimentale ancora maggiore fu la produzione di antiprotoni da parte di Emilio Segrè e Owen Chamberlain nel 1956, la produzione di antideutoni da parte di Antonino Zichichi e altri nel 1965, per arrivare alla produzione dell'antidrogeno al Cern alla fine del secolo scorso. Oggigiorno i positroni vengono prodotti e utilizzati quotidianamente sia in ambito scientifico che medicale (basti pensare alla Pet – Positron Emission Tomography). L'equazione di Dirac aveva inoltre un'altra conseguenza ancora più sorprendente, destinata a cambiare radicalmente il modo di concepire la materia: le particelle elementari non erano enti immutabili (come secondo la filosofia di Democrito), ma potevano trasformarsi tra loro, così come un fotone (quanto di luce) che interagisse con la materia poteva trasformarsi in una coppia elettrone-positrone. Inoltre, le loro



b.
La Pet (Positron Emission Tomography, tomografia a emissione di positroni) è una delle tecniche diagnostiche utilizzate oggi per la diagnostica avanzata di neoplasie. Nella foto una Discovery 690 dell'unità di Medicina Nucleare dell'Ospedale Cannizzaro di Catania, utilizzata anche dai fisici medici dei Laboratori Infn del Sud per la loro formazione.

caratteristiche (come per esempio la carica e la massa) erano determinate dalla presenza del vuoto quantistico con il quale esse interagivano.

Un'altra predizione dell'equazione di Dirac era il valore pari a due per il *fattore giromagnetico* g dell'elettrone (o di qualsiasi altra particella elementare di spin pari a $1/2$). Si tratta del rapporto (opportunamente "normalizzato") tra il momento magnetico e quello angolare di spin. Classicamente, un corpo carico rotante intorno a un asse di simmetria produce un *momento (di dipolo) magnetico* (si pensi a una spira percorsa da corrente) e un *momento angolare*. Si può dimostrare che in questo caso $g = 1$, uguaglianza che rimane valida anche nella meccanica quantistica. Nel 1925 Samuel Goudsmit e George Eugene Uhlenbeck mostrarono come l'introduzione di un campo magnetico associato allo spin dell'elettrone poteva spiegare gli spettri atomici osservati nel litio e nel sodio, se si assumeva per g il valore empirico $g = 2$. Questo valore ebbe la sua naturale giustificazione solo nel 1928, come predizione dell'equazione di Dirac. Dovettero passare circa altri vent'anni prima che misure sperimentali, condotte da John Nafe, Edward Nelson e Isidor Rabi sulla struttura *iperfine* dell'idrogeno e del deuterio e da Polykarp Kusch e Henry Foley su atomi di gallio, mostrassero nel 1947 che g invece differiva da 2 per circa lo 0,1 %, ossia che esisteva un contributo "extra" (*anomalo*) al momento magnetico dell'elettrone, espresso dall'*anomalia del momento magnetico* (indicata con a) nella semplice formula $a = (g-2)/2$.

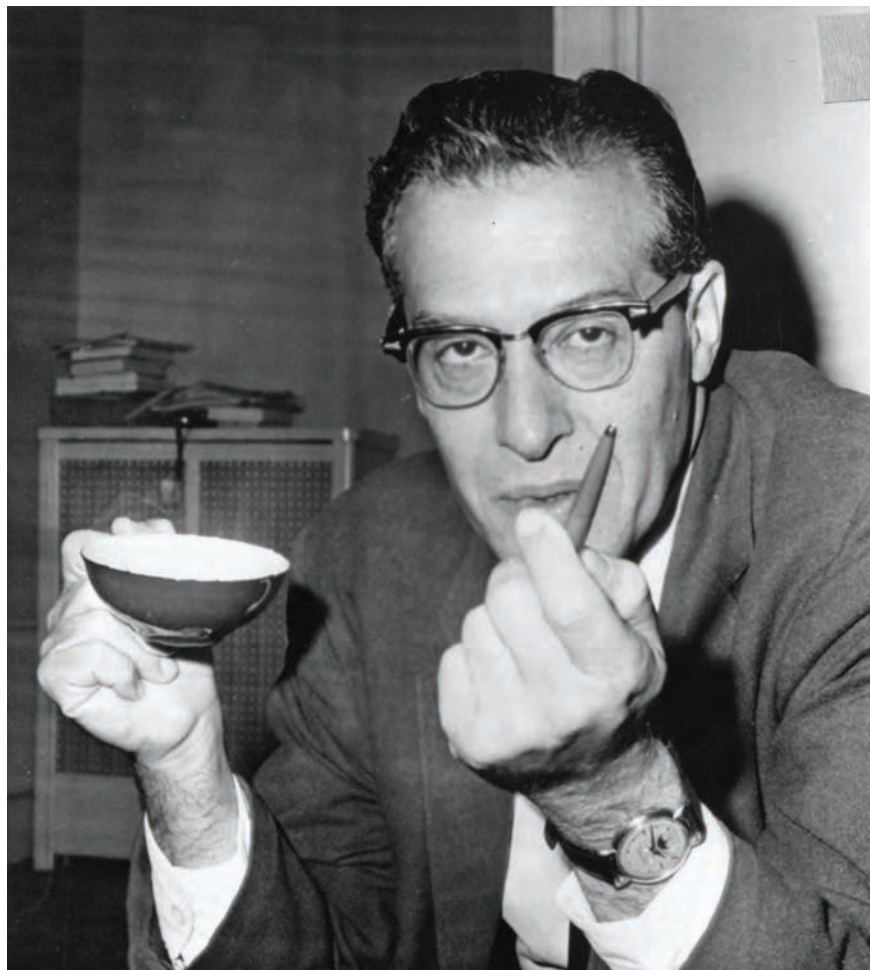
Ma cosa provocava questo contributo anomalo al momento magnetico dell'elettrone? Non potevano che essere le *correzioni radiative*, il ribollire del vuoto, quel vuoto quantistico pieno di particelle virtuali (le particelle fantasma, presenti ma invisibili, che sono un carattere centrale della teoria quantistica dei campi), a permettere all'elettrone di emettere e assorbire un fotone virtuale. Detto in altre parole, i demoni di Dirac che si agitavano nello stato di vuoto avevano degli effetti tangibili e misurabili!

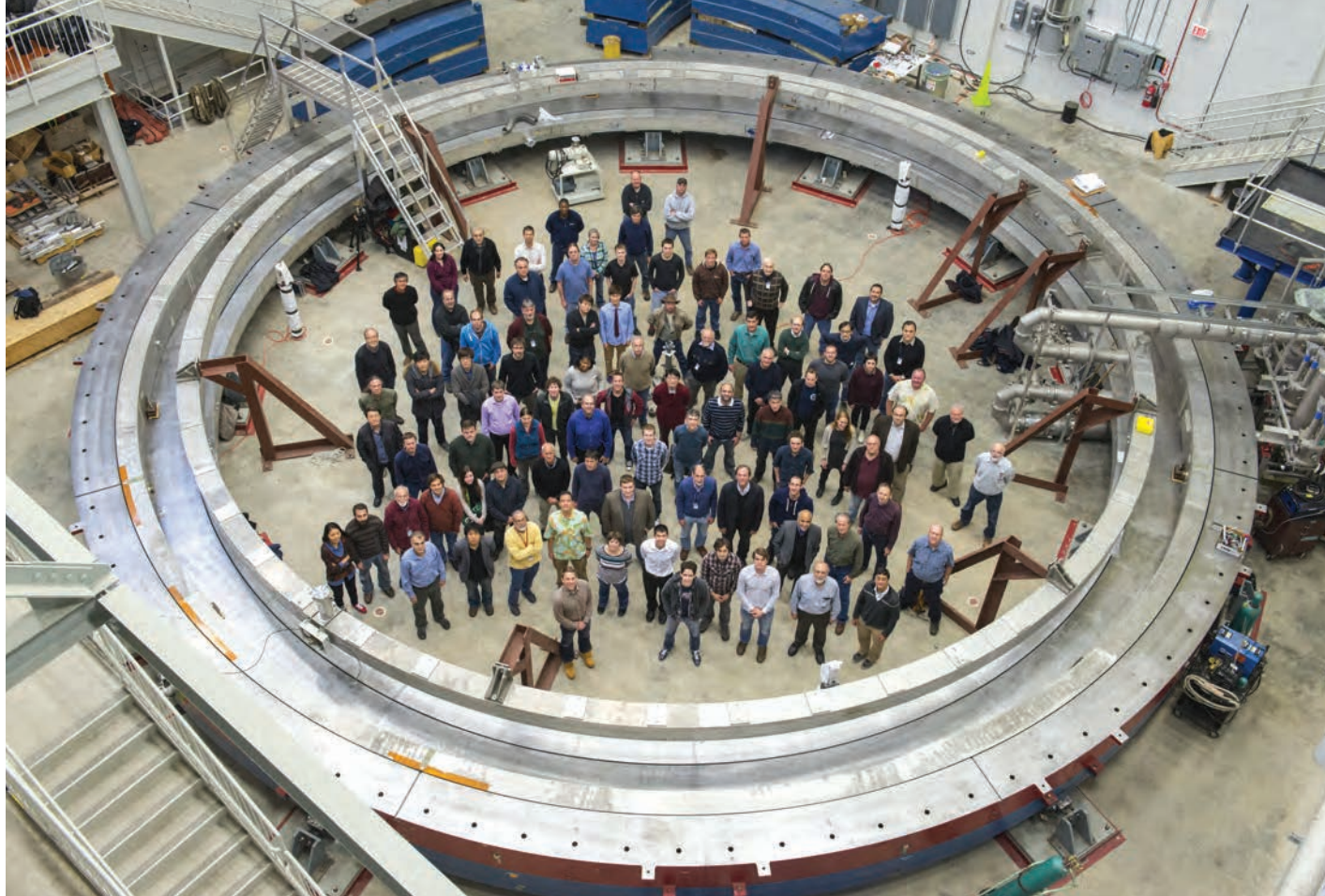
Non fu Dirac, o la prima generazione di fisici che fondarono la meccanica quantistica a calcolare gli effetti delle fluttuazioni del vuoto quantistico, ma una nuova generazione di fisici tra cui Julian Schwinger, *enfant prodige* della fisica teorica del dopoguerra, che all'età di quattordici anni ebbe modo di assistere a una conferenza di Dirac sulla teoria delle buche. Nel 1948 egli calcolò il contributo anomalo al momento magnetico dell'elettrone trovando un

ottimo accordo con il valore sperimentale di Kusch e Foley. Per la misura del momento magnetico anomalo dell'elettrone Kusch ricevette il premio Nobel nel 1955 e Schwinger, assieme a Richard Feynman e Sin-Itiro Tomonaga, nel 1965 per lo sviluppo dell'elettrodinamica quantistica.

La storia delle misure del momento magnetico dell'elettrone e poi, successivamente, del muone è uno dei capitoli più belli della fisica sperimentale. Esperimenti di precisione sempre maggiore hanno messo in evidenza come all'anomalia dell'elettrone e del muone (che data la massa 200 volte quella dell'elettrone, ha una sensibilità maggiore alle fluttuazioni del vuoto quantistico e ai possibili contributi di nuova fisica) contribuiscano non solo le coppie di elettroni e positroni, ma anche i quark e i portatori delle interazioni forti e anche i bosoni W^+ , W^- , Z^0 , messaggeri delle interazioni deboli. Anche il bosone di Higgs dà il suo contributo all'anomalia del muone.

c.
Di Julian Schwinger, fisico teorico, si diceva che il suo laboratorio fosse nella penna.





All'inizio degli anni 2000, misurando il momento magnetico anomalo del muone a una precisione di 540 parti per miliardo (che equivale a conoscere il fattore giromagnetico g , paragonato al diametro della Terra, con un'incertezza pari alle dimensioni di una formica), i fisici del Brookhaven National Laboratory di Upton, nello Stato di New York, hanno trovato che il valore misurato si discosta da quello teorico di tre deviazioni standard (e la probabilità che questo

accada a causa di una fluttuazione statistica è dello 0,3%). Questa discrepanza, per quanto non conclusiva, potrebbe essere spiegata dal contributo all'anomalia del muone di particelle tuttora ignote, come le particelle supersimmetriche (che si cercano ora in Lhc) o dei nuovi fotoni (particelle di spin pari a 1) con una massa diversa da zero (che potrebbero spiegare la materia oscura). Per poter capire se si tratta di una crepa nel modello standard o di una

fluttuazione statistica o di un eventuale effetto strumentale, è in fase di costruzione al Fermilab di Chicago (Usa) un nuovo esperimento (Muon g-2) che misurerà l'anomalia del muone con una precisione di 140 parti per miliardo (vd. fig. d). Anche grazie al risultato di questo esperimento, a cui partecipa per l'Italia anche l'Infn, tra qualche anno sapremo se il modello standard debba essere abbandonato a favore di una teoria più completa.

Biografia

Graziano Venanzoni è ricercatore presso i Laboratori Nazionali di Frascati. Da sempre interessato alla fisica di precisione, è responsabile nazionale del nuovo esperimento Muon g-2 per la misura ad altissima precisione del momento magnetico anomalo del muone presso il laboratorio americano Fermilab.

Link sul web

<http://muon-g-2.fnal.gov/>

http://www.treccani.it/enciclopedia/elettrodinamica-quantistica_%28Enciclopedia_del_Novecento%29/

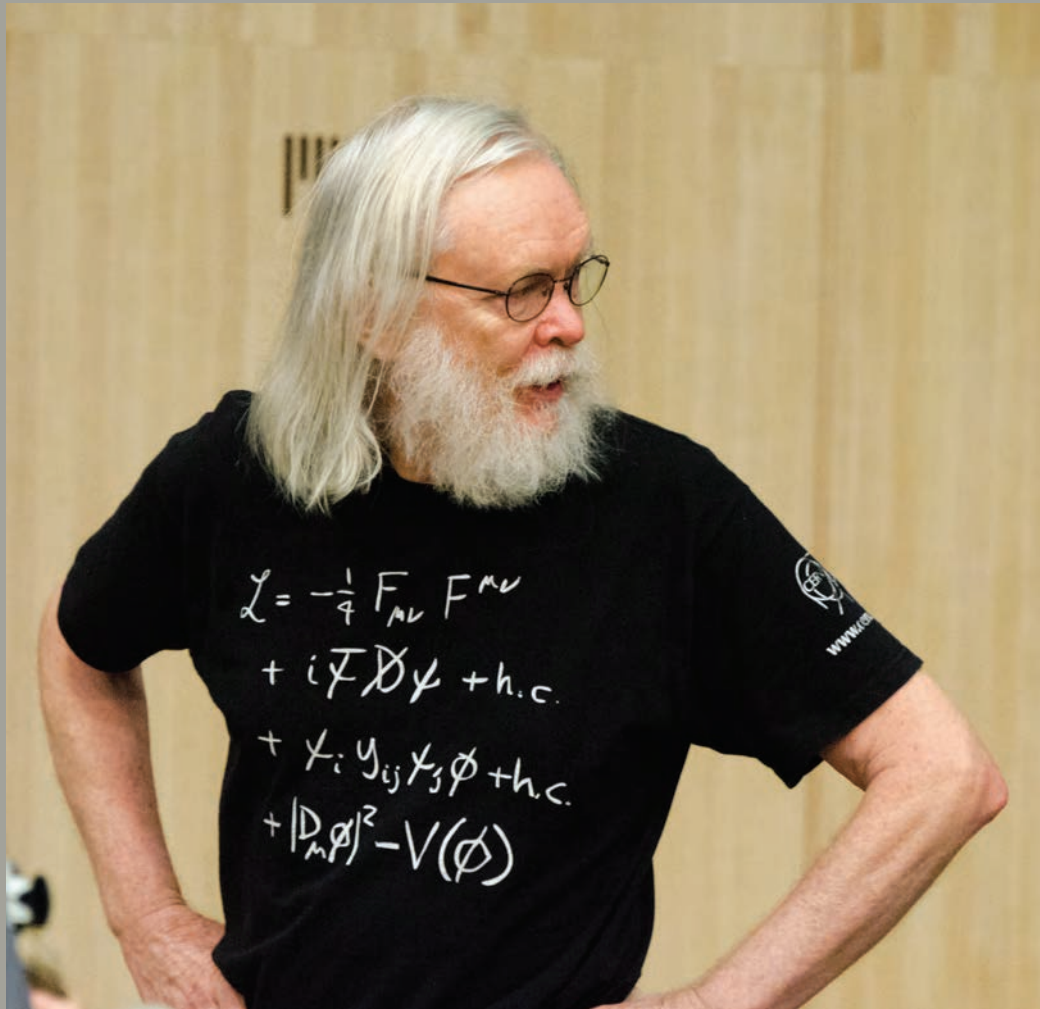
d.

La collaborazione del nuovo esperimento Muon g-2 al Fermilab nei pressi di Chicago, all'interno dell'anello dove verranno accumulati i muoni.

Tutto in una

La lagrangiana del modello standard

di Riccardo Barbieri



a.
La lagrangiana del modello standard stampata sulla maglietta del fisico teorico britannico John Ellis.

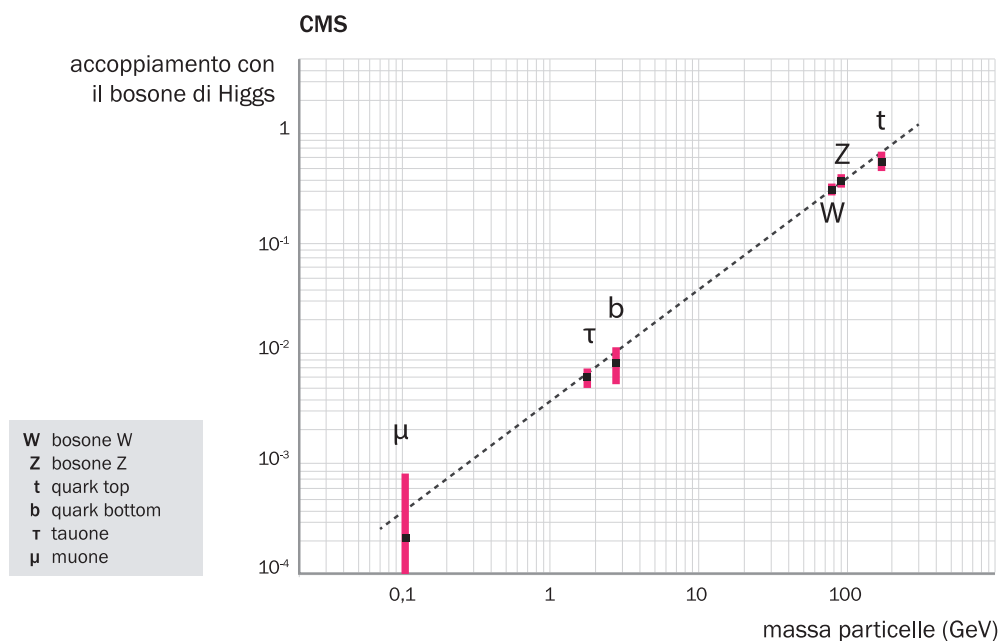
La fisica delle particelle è un quadrante della natura, le cui leggi si possono scrivere in poche righe con precisione e con assoluta aderenza alla realtà empirica. Alla base di questa affermazione sta la *lagrangiana* del modello standard, divenuta così popolare dopo la scoperta del bosone di Higgs nel luglio 2012, da comparire sulle t-shirt di qualche fisico e non solo (vd. fig. a). Queste quattro linee, concise ma precise al tempo stesso, contengono le equazioni che determinano il comportamento dei costituenti di tutta la materia, sia se osservata nell'esperienza quotidiana che se prodotta nell'universo primordiale caldo o nelle collisioni fra particelle di altissima energia. Un fatto sorprendente forse, alla luce della complessità delle manifestazioni della materia ai vari livelli, dalla chimica fino alla biologia, ma assolutamente vero.

La lagrangiana del modello standard affonda le sue radici nella metà dell'800, nelle equazioni di Maxwell (vd. p. 12), si basa sia sulla relatività speciale (vd. p. 16) che sulla meccanica quantistica (vd. p. 19) e assume la sua forma attuale, quella rappresentata nella t-shirt, negli anni sessanta del '900, soprattutto, ma non solo, grazie ai contributi di Abdus Salam, Shelley Glashow e Steven Weinberg, premiati con il premio Nobel nel 1979. La forma della lagrangiana alla fine degli anni sessanta era quella giusta, ma la sostanza doveva completarsi nei primi anni settanta. Da allora la lagrangiana del modello standard non è più cambiata e ha ricevuto una progressione di conferme sperimentali impressionanti per estensione e precisione. I protagonisti della lagrangiana del modello standard sono i campi, più fondamentali delle particelle dopo l'affermarsi del principio di indeterminazione di Heisenberg (vd. p. 19) nella seconda metà degli anni venti del '900. I campi sono quantità di vario genere con valori assegnati in ogni punto dello spazio e del tempo, mentre le particelle (l'elettrone, il fotone, ecc.) sono vibrazioni localizzate dei corrispondenti campi (il campo dell'elettrone, il

campo elettromagnetico nel caso del fotone, ecc.), simili alle onde di un lago altrimenti calmo. Nella prima riga della lagrangiana, e implicitamente anche nella seconda, compaiono i campi dei mediatori delle interazioni elettromagnetiche (il fotone, "scoperto" da Einstein nel 1905), delle interazioni deboli (i bosoni W e Z, la cui scoperta valse il premio Nobel a Carlo Rubbia e Simon van der Meer) e delle interazioni forti (i gluoni, rivelati nel laboratorio Desy ad Amburgo alla fine degli anni settanta). Nella seconda e nella terza riga della lagrangiana intervengono i costituenti veri e propri della materia, denotati globalmente con la lettera greca Ψ : l'elettrone, il neutrino e i due quark, up e down, che sono i principali componenti del protone e del neutrone. In realtà, nella terza riga, il campo Ψ porta un indice "i" o "j", a ricordare che i campi di materia esistono in tre repliche, dunque "i, j" da 1 a 3, con interazioni identiche fra loro ma con masse diverse. È nell'universo primordiale (vd p. 32) che le repliche più pesanti, inizialmente scoperte nei raggi cosmici (il muone e il quark strange) e prodotte artificialmente negli acceleratori di alta energia (il leptone tau e i

b.
Sheldon Lee Glashow (Usa), Abdus Salam (Pakistan) e Steven Weinberg (Usa) durante la cerimonia di consegna del premio Nobel a Stoccolma nel 1979.





c. Secondo il modello standard la massa delle particelle è determinata dal loro accoppiamento con il bosone di Higgs. In questo grafico sono riportati gli accoppiamenti di alcune particelle con l'Higgs, misurati in Lhc in funzione della loro massa. La linea tratteggiata rappresenta la predizione del modello standard.

quark top, bottom e charm), vivono democraticamente insieme alla prima, quella di cui siamo fatti anche noi (l'elettrone e i quark up e down). Infine nella quarta riga della lagrangiana del modello standard, ma già anche nella terza, compare il campo di Higgs, denotato con la lettera greca Φ , ultimo a completare il quadro delle particelle previste e scoperte nel modello standard: una progressione iniziata nel 1897 con la scoperta dell'elettrone e terminata nel 2012 con il bosone di Higgs. Cosa consente di affermare che le quattro righe del modello standard diano una rappresentazione sintetica ma al tempo stesso fedele e accurata del mondo delle particelle elementari? Non rappresentano forse un livello di astrazione troppo alto, che alla fine fa perdere o comunque diluisce fortemente il contatto con la realtà empirica? Da un lato, sono importanti gli elementi di coerenza interna della teoria, come il ruolo ubiquo delle simmetrie, le trasformazioni che lasciano invariata la lagrangiana del modello standard (vd. Asimmetrie n. 11, ndr). In questo esistono forti elementi di similitudine con la relatività generale, la teoria che descrive la gravità (vd. p. 29), l'unica forza non inclusa nel modello standard, irrilevante nel mondo delle particelle. Dall'altro lato, non manca qualche aspetto di significativa inefficacia del modello standard, come l'incapacità di calcolare le masse delle varie particelle di materia. Ma si può dire che la "forza di verità" della lagrangiana stia nel coerente accordo con la serie estesissima, per varietà e precisione, di esperimenti che si sono succeduti in oltre un quarantennio per verificare il modello standard dopo la sua formulazione.

Volendo tentarne una descrizione sintetica, si comincia con la previsione dell'esistenza di una nuova forza, oltre l'elettromagnetismo e le interazioni responsabili della radioattività: la forza mediata dal bosone Z, puntualmente rivelata nel 1973-74 al Cern con un importante contributo italiano. Si continua con l'emergere, una a una, di tutte le

particelle previste dal modello standard, a partire dal quark charm, scoperto nel 1974 allo Slac a Stanford e al Bnl a Brookhaven, due laboratori negli Stati Uniti. Si rende quantitativamente manifesta la proprietà dei quark di interagire sempre più debolmente quanto più sono visti da vicino. Si verifica a varie distanze e con notevole precisione la coerenza cosiddetta "quantistica" della teoria in tutti i suoi settori, oltre quello della Qed, pure inclusa nel modello standard (vd. p. 10). Da ultimo, ma certo non da meno, si evidenzia la proporzionalità diretta fra le masse delle particelle (per ora quelle più pesanti) e il loro accoppiamento con il bosone di Higgs distribuito uniformemente nello spaziotempo (vd. fig. c). Le leggi fisiche, per loro intrinseca natura, non sono mai definitive. Dunque molti si chiedono, anche per buone ragioni, se e come la lagrangiana del modello standard possa essere superata. Per il momento resiste. Modello standard o "teoria standard", dunque?

Biografia

Riccardo Barbieri è nato a Parma nel 1944. Dal 1984 è professore ordinario di fisica teorica, prima all'Università di Pisa e, dal 1998, alla Scuola Normale Superiore. È stato *visiting professor* all'Ecole Normale di Parigi e *Muller Professor* all'Università di Berkeley. È autore di oltre 200 pubblicazioni sulla teoria e fenomenologia delle particelle elementari.

Link sul web

<https://www.youtube.com/watch?v=HYL6Zdq-MCk>

Geometrica bellezza

Relatività generale cent'anni dopo

di Fulvio Ricci

a.
L'equazione della relatività generale, dipinta da un anonimo autore su una locomotiva abbandonata nel deserto di Atacama (Cile).

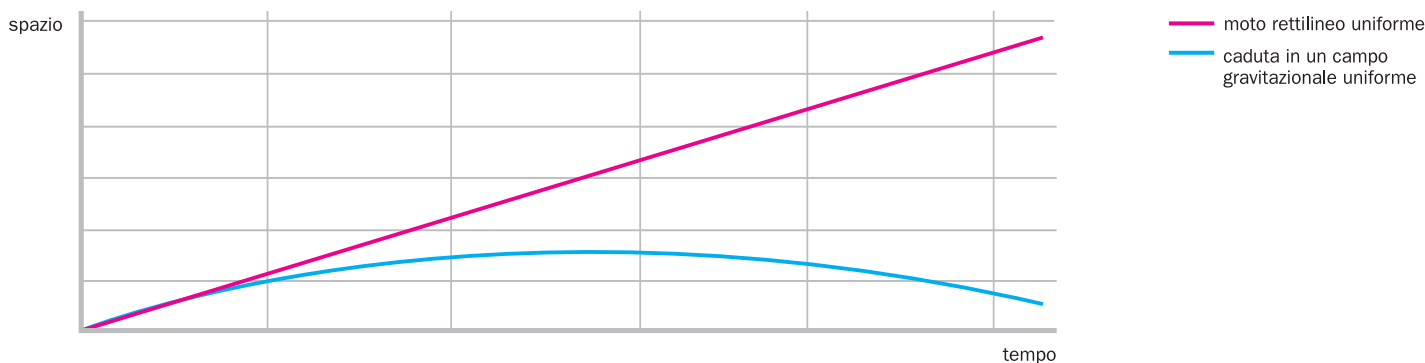


Cento anni fa, nel novembre 1915, in quattro lezioni all'Accademia delle Scienze, Einstein presentava la sua teoria della relatività generale. Era il frutto di dieci anni di studi, in cui il celebre scienziato cercava di raccordare la sua teoria della relatività speciale (vd. p. 16, ndr) con la teoria della gravitazione universale di Newton.

L'equazione alla base della nuova teoria, chiamata anche equazione di campo di Einstein, dipinta da un anonimo autore su una locomotiva abbandonata nel deserto di Atacama nel Cile (vd. fig. a), si basa sul principio di equivalenza (vd. in Asimmetrie n. 14 p. 12, ndr). Questo principio è un esempio particolare di simmetria locale. La proporzionalità tra massa gravitazionale e inerziale, infatti, fa sì che per un osservatore all'interno di una cabina in caduta libera la forza gravitazionale sia cancellata. Tuttavia, ciò non è vero in assoluto, se si tiene conto del fatto che il campo gravitazionale non è uniforme. Infatti, l'enunciato completo del

principio di equivalenza fa riferimento a corpi di piccola estensione, tali che effetti legati ai gradienti gravitazionali interni ed esterni ad essi possano essere trascurati. In breve, la località di questo principio è una conseguenza della dipendenza dalla distanza dal campo gravitazionale.

In fig. b (vd. p. 30) è riportato il diagramma spazio-temporale di un corpo che si muove in assenza di forze e quello dello stesso corpo che cade in un campo gravitazionale uniforme. Si deduce immediatamente che in assenza di forze il corpo traccia linee rette nello spaziotempo, mentre la gravità curva queste linee. Ciò spinse Einstein a rappresentare l'interazione gravitazionale attraverso le caratteristiche geometriche delle linee dello spaziotempo descritte dai corpi, che non costituiscono più un reticolato rigido di rette, ma sono un insieme di linee che si curvano in funzione della distribuzione della materia. Cerchiamo di capire meglio l'equazione di campo di Einstein. La grandezza che permette



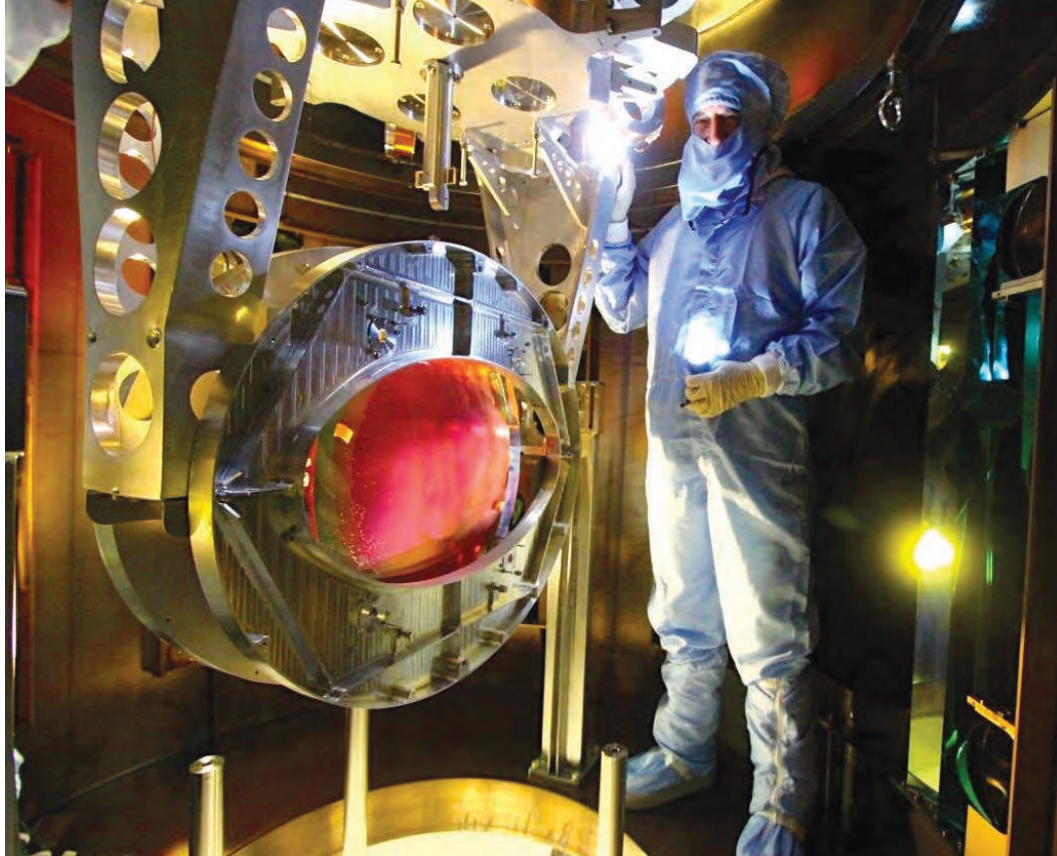
di calcolare la distanza tra punti in uno spaziotempo curvo e, quindi, esprime in termini matematici le proprietà geometriche dello spaziotempo è il *tensore metrico*, una matrice di 4 per 4 componenti. Ciascun termine della matrice si può indicare con $g_{\mu\nu}$, dove gli indici μ e ν vanno da 1 a 4 e rappresentano le coordinate dello spaziotempo. I termini $g_{\mu\nu}$, in un sistema di riferimento qualsiasi, possono assumere valori diversi da punto a punto. Questo è la conseguenza del principio di località su cui si fonda l'equazione della relatività generale. A sinistra del segno di uguaglianza, oltre a $g_{\mu\nu}$, compare $R_{\mu\nu}$, una matrice che rappresenta la curvatura dello spaziotempo e che dipende dalle derivate seconde del tensore metrico $g_{\mu\nu}$. A destra, l'altra matrice $T_{\mu\nu}$ rappresenta la sorgente dell'interazione gravitazionale. Per Einstein questa sorgente non è soltanto la densità della materia, ma anche la densità e il flusso dell'impulso e dell'energia della materia stessa, ovvero il suo stato di moto. $T_{\mu\nu}$ rappresenta quindi il tensore energia-impulso della meccanica relativistica.

Il coefficiente che moltiplica la matrice sorgente ci informa su quanto sia debole l'effetto della gravità sulla geometria dello spaziotempo: una significativa curvatura dello spaziotempo si ottiene quando entrano in gioco forze che compensano il piccolissimo fattore G/c^4 . In senso figurato, si usa dire che la materia e il suo stato di moto ($T_{\mu\nu}$) determinano la struttura locale delle linee dello spaziotempo ($R_{\mu\nu}$ e quindi $g_{\mu\nu}$), che a loro volta determinano lo stato di moto della materia.

In termini più propriamente matematici, la formula scritta a caratteri cubitali sulla locomotiva della foto rappresenta un sistema di equazioni accoppiate non lineari, la cui soluzione in genere è ricavabile solo per via numerica.

La gravitazione di Einstein descrive fenomeni non previsti dalla teoria di Newton e in particolare apre il nuovo capitolo della *gravitodinamica*. Partendo da questa equazione, il 22 giugno del 1916 lo stesso Einstein presentò all'Accademia prussiana come si trasforma questa equazione nell'ipotesi di una piccola perturbazione di uno spaziotempo, in cui la gravità sia assente. Ricavò così la ben più nota *equazione delle onde di D'Alembert*, che rappresenta la propagazione della perturbazione: si tratta della prima e completa teorizzazione dell'esistenza di *onde gravitazionali* (perturbazioni dello spaziotempo). Tuttavia, occorre attendere i lavori di Bondi e Pirani della fine degli anni cinquanta per avere un'analisi rigorosa dell'effetto prodotto da un'onda su masse liberamente gravitanti. In essi si dimostra che questo effetto è osservabile ed è su queste basi che Jo Weber raccolse la sfida di costruire il primo rivelatore di onde gravitazionali (vd. anche in *Asimmetrie* n. 5 p. 22, ndr). Egli potrebbe aver incontrato Edoardo Amaldi alla Scuola Internazionale "Enrico Fermi" di Varenna nell'estate del 1961 stimolandone l'interesse. Amaldi dette impulso alla ricerca sui rivelatori di onde gravitazionali in Italia, che poi si è sviluppata in tutti questi anni nell'Infn, esplorando diverse strategie di misura che hanno portato oggi alla realizzazione dell'attuale interferometro Virgo (vd. in *Asimmetrie* n. 5 p. 14 e in *Asimmetrie* n. 15 p. 30, ndr). Nella sua configurazione iniziale, pur non rivelando nessun segnale gravitazionale, Virgo ha già ottenuto significativi risultati scientifici, ad esempio ponendo limiti a una vasta categoria di modelli cosmologici basati sulla teoria delle stringhe (vd. in *Asimmetrie* n. 17 p. 12) o deducendo i limiti superiori di deformazione dalla forma sferica di alcune stelle pulsar (in pratica, un limite sull'altezza delle montagne presenti sulla stella di neutroni).

b.
Diagramma spazio-temporale di un corpo che si muove in assenza di forze (linea rosa) e che cade in un campo gravitazionale uniforme (linea blu).



Ma la sfida sperimentale per la prima rivelazione continuerà con Advanced Virgo (Adv). Il nuovo interferometro è progettato per ottenere una sensibilità di circa un ordine di grandezza superiore a quella di Virgo: ciò corrisponde a un aumento di circa tre ordini di grandezza del tasso di segnali gravitazionali emessi nella fase finale della vita di un sistema di due stelle di neutroni che, spiraleggiando l'una attorno all'altra, finiscono per collidere. Esso è uno dei tre rivelatori della rete internazionale di cui sono parte integrante i due analoghi interferometri del progetto Ligo negli Stati Uniti d'America. Advanced Virgo è ora nella fase di integrazione dei suoi componenti fondamentali, realizzati nei laboratori dell'Infn, del Cnrs e di Nikhef. Adv ha una configurazione ottica diversa da Virgo e dei nuovi specchi. Per ridurre l'impatto del rumore termico e le fluttuazioni della pressione di radiazione, la massa degli specchi è ora di 42 kg rispetto ai 22 kg di quelli di Virgo ed è stata aumentata la dimensione del fascio luminoso che vi incide. Pertanto, a differenza di Virgo, la sezione più stretta del fascio luminoso nelle cavità principali sarà posizionata vicino al centro delle cavità Fabry-Perot di 3 km di lunghezza. Specchi più pesanti e fasci luminosi che investono una porzione più vasta della loro superficie hanno richiesto un grande sforzo

tecnologico, che ha portato allo sviluppo di nuove macchine di deposizione di film sottili, sospensioni degli specchi più performanti, connessioni da vuoto più grandi nella zona centrale e nuovi telescopi ottici all'ingresso e all'uscita dell'interferometro, il cui allineamento è un'ulteriore sfida sperimentale. La fase di integrazione è ormai prossima alla conclusione: la rete dei rivelatori Ligo/Advanced Virgo sarà completata nel 2016 con l'obiettivo dichiarato di rivelare il primo segnale di onde gravitazionali prima della fine di questo decennio e dare così un'ulteriore conferma sperimentale della relatività generale di Einstein.

c.

Uno dei nuovi specchi di Advanced Virgo in fase d'assemblaggio. Gli specchi sono sorretti da sottili fibre di silice e la loro superficie riflettente è protetta da un sottile strato polimerico, che sarà rimosso una volta concluso il montaggio.

Biografia

Fulvio Ricci è professore di Fisica Sperimentale presso la Sapienza Università di Roma. Esperto di gravitazione sperimentale e di sistemi di rivelazione di onde gravitazionali, ha lavorato prima a Frascati e poi al Cern. A partire dal 1995 lavora all'interferometro Virgo. È stato tra i firmatari del primo memorandum d'intesa per l'attività congiunta di analisi con la collaborazione americana Ligo. Attualmente è il responsabile scientifico di Virgo.

Link sul web

<http://public.virgo-gw.eu>

Hot stories

Energia e temperatura nell'evoluzione dell'universo

di Sabino Matarrese



a.

In una calda e limpida giornata estiva la radiazione emessa dal Sole, la cui superficie esterna ha una temperatura di circa 6000 K, cede energia alle molecole d'aria e la temperatura dell'aria può raggiungere anche 43°C (ovvero 316 K). Questa equivalenza tra energia e temperatura vale in tutti i sistemi fisici, anche nell'universo primordiale.

Il modello cosmologico standard viene anche chiamato – non a caso – “modello dell’hot Big Bang”. La parola “hot” rappresenta qui una sorta di bandiera, posta a ricordo di una battaglia scientifica, vinta da chi sosteneva che l’universo nel suo passato fosse stato molto più caldo dell’universo attuale, contro i fautori del modello detto “dello stato stazionario”, secondo i quali l’universo sarebbe stato caratterizzato da un tasso costante di espansione, grazie alla continua creazione di materia-energia, e che fosse un universo eterno e immutabile. La diatriba tra queste due scuole di pensiero si concluse a metà degli anni '60, soprattutto grazie alla scoperta da parte dei due radioastronomi americani Arno Penzias e Robert Wilson dell’esistenza di una *radiazione cosmica di fondo* termica nella banda delle microonde, a

una temperatura di circa 2,7 K (circa 270° C sotto lo zero). Questa radiazione viene oggi unanimemente interpretata come il residuo fossile di epoche cosmiche primordiali, durante le quali la materia ordinaria, o *barionica* (formata da protoni, elettroni, ecc.), era in equilibrio termodinamico con la radiazione.

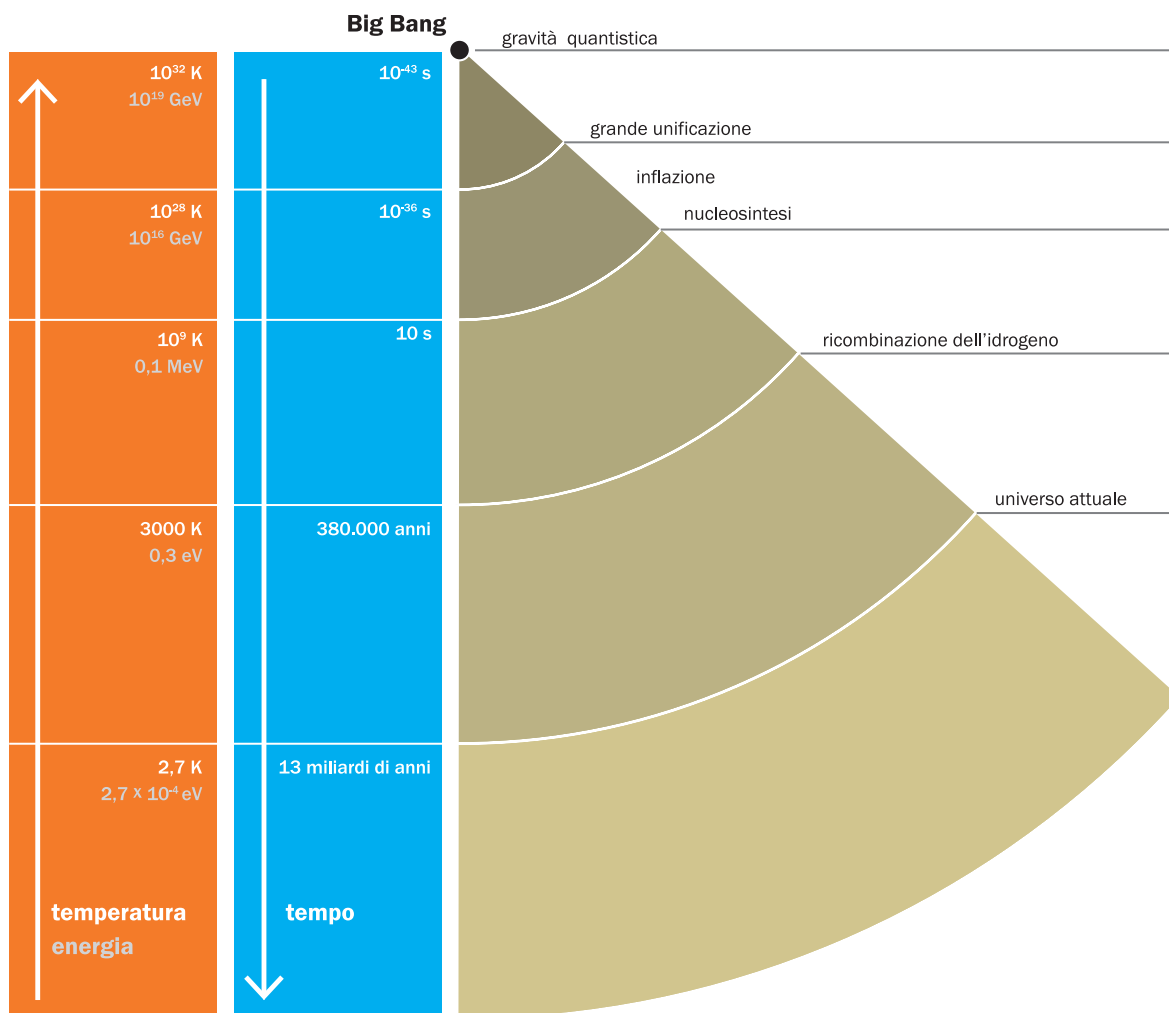
In condizioni di equilibrio, ad ogni temperatura T (espressa in Kelvin) corrisponde una scala di energia E , secondo l’equazione $E = kT$, dove $k = 1,38 \times 10^{-23}$ J/K è la *costante di Boltzmann*. Grazie a questa equazione capiamo immediatamente che l’affermazione secondo la quale nell’universo primordiale sono state possibili temperature elevatissime implica che le particelle elementari allora presenti hanno potuto raggiungere energie elevatissime: in tali condizioni l’intero universo



si presenta quindi come un infinito acceleratore di particelle, capace di raggiungere scale di energia inaccessibili perfino ai nostri più avanzati laboratori terrestri.

L'equilibrio tra materia e radiazione fu successivamente rotto, quando si raggiunsero le condizioni adatte alla formazione dei primi atomi di idrogeno neutro, con la conseguente quasi totale scomparsa degli elettroni liberi (con i quali i fotoni della radiazione cosmica possono più facilmente interagire). Questo evento, chiamato *ricombinazione dell'idrogeno*, avviene quando l'universo ha raggiunto un'età di circa 380 mila anni (da confrontarsi con l'età attuale dell'universo, pari a 13,8 miliardi di anni!) e porta presto al "disaccoppiamento" tra materia e radiazione. Successivamente al disaccoppiamento, non dovendo più sottostare alla legge di evoluzione termica imposta dalla radiazione, la materia ordinaria si raffredda molto rapidamente, creando così le pre-condizioni per la contrazione gravitazionale che porterà alla formazione delle prime stelle. La radiazione cosmica continua nel suo lento processo di raffreddamento e rarefazione causato dall'espansione cosmica (vd. in *Asimmetrie* n. 15 p. 33, ndr), come se nulla fosse accaduto (con una breve parentesi dovuta alla reionizzazione dell'idrogeno in

epoche relativamente più recenti), fino a raggiungere oggi quei 2,7 K sopracitati. Torniamo però a interessarci della storia termica dell'universo (vd. fig. b a p. 34) antecedente al disaccoppiamento della materia dalla radiazione. Se procediamo a ritroso nel tempo fino a qualche secondo dopo il Big Bang (l'origine – se non altro convenzionale – dei tempi), incontriamo un altro evento di importanza fondamentale: la *nucleosintesi primordiale* degli elementi leggeri, ovvero dell'elio e di altri elementi quali deuterio, trizio e litio. Fu proprio la necessità di spiegare la grande abbondanza in massa dell'elio (circa un quarto dell'intera massa in materia ordinaria) a convincere alcuni scienziati del secolo scorso, primo fra tutti George Gamow, a ipotizzare l'esistenza di una fase calda nell'universo primordiale, di cui avremmo dovuto trovare oggi testimonianza sotto forma di radiazione fossile a pochi gradi Kelvin! La teoria di Gamow e collaboratori fu poi confermata dalla scoperta di Penzias e Wilson, i quali per questo motivo furono insigniti del premio Nobel nel 1978. Il processo di nucleosintesi primordiale si compie nei primi minuti di vita dell'universo. Poco prima della nucleosintesi primordiale incontriamo un altro evento significativo: il



disaccoppiamento dei neutrini dal resto dell'universo, ovvero la perdita della loro capacità di interagire con le altre particelle del fluido cosmico. Tale fenomeno avviene, perché i neutrini sono sensibili alle sole interazioni nucleari deboli, che diventano inefficaci quando la temperatura media dell'universo scende al di sotto di una decina di miliardi di Kelvin, che si raggiunge quando l'universo compie i suoi primi secondi di vita. Sebbene molti dati ci portino a concludere che i neutrini rappresentino oggi una componente decisamente minoritaria dal punto di vista del "budget" energetico cosmico, il loro ruolo nel passato non è stato affatto trascurabile: basti ricordare che il contributo energetico dei neutrini alla radiazione in epoche primordiali è stato a lungo dominante. Oggi, i neutrini di origine cosmica formano un fondo, rivelabile indirettamente dallo studio della distribuzione delle strutture cosmiche e degli effetti che esso ha sulle *anisotropie* (minuscole

fluttuazioni in temperatura nelle diverse direzioni di osservazione) della radiazione cosmica di fondo alle microonde. Quest'ultimo effetto è stato recentemente confermato dai risultati dell'analisi dei dati raccolti dal satellite Planck dell'Agenzia Spaziale Europea (Esa). Questi risultati, assieme all'accordo tra le predizioni della teoria con le osservazioni sull'abbondanza degli elementi leggeri, ci confermano che siamo in grado di ricostruire con grande precisione la storia termica dell'universo a partire da pochi secondi dopo il Big Bang. Ma le nostre conoscenze teoriche attuali e molti riscontri osservativi consentono di risalire ancora più indietro nel tempo, fino a speculare sullo stato del cosmo e sui processi fisici avvenuti 10^{-33} secondi (ovvero qualche milionesimo di miliardesimo di miliardesimo di miliardesimo di secondo) dal Big Bang. In epoche precedenti alla nucleosintesi la storia termica del cosmo è stata caratterizzata da una sequenza di transizioni di fase. Questo

b.
La storia termica dell'universo, con la scala delle temperature/energie corrispondenti alle epoche principali e quella dei tempi trascorsi dal Big Bang.

c.
Il satellite Planck nel 2009, prima
del suo lancio nello spazio.



fenomeno è legato a uno dei concetti più importanti della fisica delle particelle elementari degli ultimi decenni: la scoperta della rottura spontanea di alcune simmetrie. Un esempio fra tutti: la rottura della simmetria elettrodebole, a causa della quale la forza nucleare debole a basse energie si manifesta come interazione a corto *range*, al contrario della forza elettromagnetica, capace di farsi sentire fino a lunghe distanze. Ebbene, nell'universo primordiale le scale di energia coinvolte sono così elevate, da rimettere in gioco la sottostante simmetria che unifica queste due forze, restituendo a entrambe la capacità di agire a lungo *range*. Questa transizione, che dalla fase di simmetria restaurata ad alta temperatura porta alla fase di simmetria rotta, avviene quando l'universo è estremamente giovane: circa un decimo di

miliardesimo di secondo dal Big Bang. A temperature ben più elevate (circa cento mila miliardi di volte maggiori) si ipotizza vi sia stata un'altra transizione di fase, legata alla cosiddetta Grande Unificazione tra forza forte, debole ed elettromagnetica, come predetto dalle teorie Gut (vd. p. 15, ndr). Entriamo qui nel regno delle ipotesi più affascinanti. Si ipotizza infatti che a queste energie l'universo abbia sperimentato una brevissima espansione accelerata: brevissima ma gravida di conseguenze su tutto ciò che abbiamo fin qui raccontato. Stiamo parlando di quello che i cosmologi chiamano *inflazione*, una crescita esponenziale delle scale di lunghezza cosmiche grazie alla quale si sono generate tutte le caratteristiche osservabili dell'universo che oggi osserviamo: dalla sua rassicurante uniformità su grande scala, giù fino a tutta la complessità delle strutture cosmiche, strutture formate a partire da "semi" primordiali, che avrebbero avuto origine proprio da quella rapidissima fase di espansione inflazionaria grazie a minuscole oscillazioni quantistiche del vuoto.

Con l'inflazione ci siamo spinti indietro fino ai fatidici 10^{-33} secondi sopra ricordati. Cos'è avvenuto prima dell'inflazione? L'universo ha attraversato fasi di espansione caratterizzate da temperature e scale di energie ancor più elevate? È veramente esistito un inizio dei tempi con le caratteristiche del Big Bang? L'inflazione porta con sé un "bonus" formidabile: essa cancella di fatto ogni memoria delle fasi precedenti, così che la risposta a tali domande non è più rilevante ai fini della storia termica successiva e delle condizioni attuali dell'universo.

Biografia

Sabino Matarrese è professore ordinario di Astrofisica e Cosmologia dell'Università di Padova. Ha svolto attività di ricerca in ambito cosmologico anche presso la Sissa (Trieste) e l'Mpa (Garching). È membro del gruppo di ricerca della missione Planck dell'Esa.

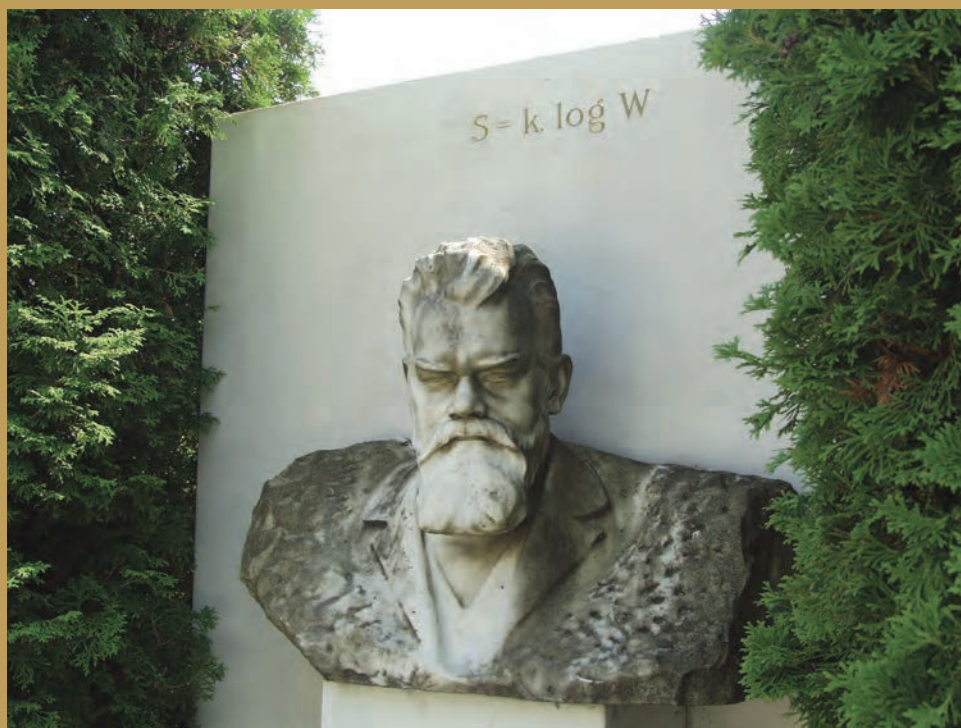
Link sul web

http://www.damtp.cam.ac.uk/research/gr/public/bb_history.html

La misura del disordine

Dall'equazione di Boltzmann ai buchi neri

di Stefano Giusto



a.

La tomba di Ludwig Boltzmann (1844-1906), nel cimitero centrale di Vienna, Austria.

L'importanza dell'equazione $S = k \log W$ non potrà sfuggire a chiunque visiti la tomba del suo scopritore, Ludwig Boltzmann: essa è infatti indelebilmente incisa nel marmo della lapide tombale. L'equazione cattura una relazione, profonda e sorprendente, tra realtà macroscopica e microscopica. S è l'*entropia*, grandezza fisica che compare in entrambe le leggi fondamentali della termodinamica, espressione delle proprietà generali dei sistemi macroscopici, cioè di quei sistemi costituiti da un numero molto grande di costituenti elementari. Sono sistemi macroscopici un gas, una scheggia di vetro o una qualunque porzione non artificialmente piccola della materia che ci circonda. Nella nostra percezione tipica

della realtà fisica, basata su un'osservazione grossolana, i sistemi macroscopici sono descritti da un numero ridotto di grandezze fisiche, quali la temperatura e il volume. La conoscenza di queste quantità termodinamiche è sufficiente per determinare l'entropia o qualunque altra proprietà grossolanamente rilevabile del sistema macroscopico. Ma questo piccolo numero di variabili non è sufficiente per caratterizzare accuratamente il sistema, cioè per individuare precisamente lo stato di tutti i suoi costituenti elementari. Esiste tipicamente un numero molto grande di configurazioni microscopiche descritte dagli stessi parametri termodinamici: per esempio, un bicchiere d'acqua a una data temperatura può

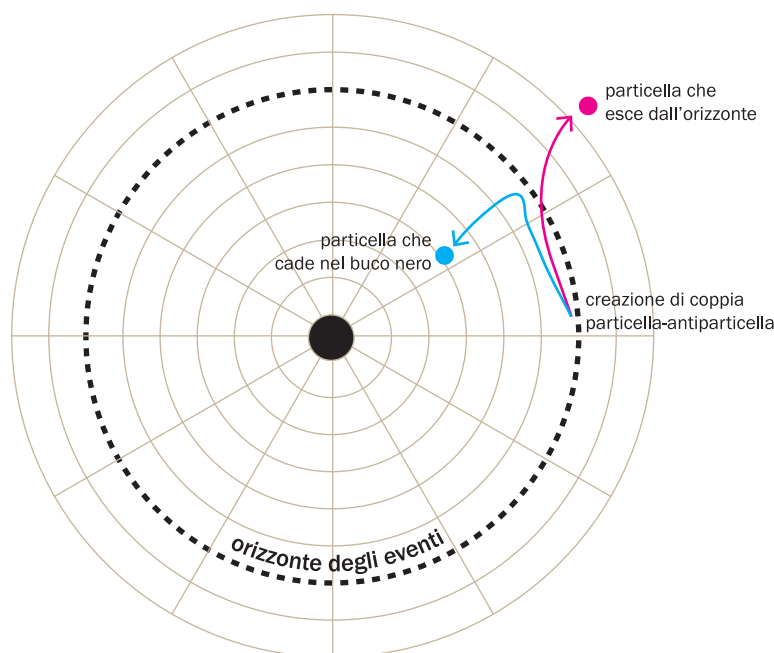
corrispondere a una qualunque tra dieci elevato a dieci elevato a 25 possibili micro-configurazioni, o *microstati*. Questo numero è il W che compare al secondo membro della nostra equazione. La costante k è la stessa che compare nell'equazione descritta nell'articolo precedente (vd. p. 32, ndr) ed esprime il fattore di proporzionalità tra l'energia media di ogni grado di libertà elementare del sistema macroscopico e la sua temperatura. Nonostante porti il nome di Boltzmann, non fu lui, ma probabilmente Max Planck, il primo a determinarne il valore. In effetti, l'equazione incisa sulla lapide tombale non fu mai scritta dal fisico austriaco in quella forma. La sostanziale attribuzione a Boltzmann della formula è però indiscussa. Si deve

certamente a suoi lavori l'intuizione che l'entropia conta il numero di stati microscopici possibili per un certo stato macroscopico. Alla luce di questo, uno stato di entropia maggiore ha una probabilità enormemente più grande di realizzarsi di uno stato di minore entropia, ed è per questo che nei processi fisici si osserva sempre un aumento di entropia, come espresso nella seconda legge della termodinamica. L'intuizione che la seconda legge abbia un'origine probabilistica e non sia derivabile esclusivamente dalle leggi della meccanica è strabiliante, se si pensa che è stata formulata in un periodo in cui neppure l'esistenza dei costituenti elementari della materia, atomi e molecole, era ancora universalmente accettata. È altrettanto strabiliante che, dopo più di un secolo, l'equazione di Boltzmann giochi ancora un ruolo centrale nello sviluppo della fisica teorica: fornendo un legame tra proprietà microscopiche e macroscopiche di un sistema, può rappresentare uno stringente vincolo di coerenza per una teoria. Un ambito sorprendente dove questa equazione sta giocando un ruolo cruciale è nello studio teorico dei buchi neri, e dunque nello sviluppo di una teoria coerente di gravità quantistica (vd. in *Asimmetrie* n. 17 p. 4, ndr). A prima vista un buco nero ha poco a che spartire con un sistema termodinamico: la relatività generale descrive un buco nero come una soluzione classica caratterizzata da una singolarità centrale e da un orizzonte degli eventi da cui nessun segnale può sfuggire, e non offre certamente motivi per pensare che sia formato da un numero molto grande di costituenti microscopici. Eppure il fisico Jacob Bekenstein ha fatto notare che, per essere in accordo con la seconda legge

della termodinamica, un buco nero debba possedere un'entropia. Quando un qualunque corpo macroscopico, con un'entropia S , viene inghiottito dall'orizzonte di un buco nero, l'entropia del mondo esterno all'orizzonte diminuisce di S . Il buco nero nello stato finale, d'altra parte, appare molto simile a prima, soltanto un po' più grande e massiccio, avendo inglobato la massa del corpo. Si può infatti provare che la geometria di un buco nero è unicamente determinata dalla sua massa e da eventuali altre *cariche globali*, quantità che giocano il ruolo di variabili termodinamiche per il buco nero. Poiché l'entropia dell'universo non può diminuire, è necessario ammettere che l'entropia del buco nero sia aumentata. Poiché l'unica variazione nel buco nero, dopo aver inglobato il corpo con entropia S , è un aumento dell'area dell'orizzonte, l'entropia e l'area dell'orizzonte devono essere proporzionali. Se S è non nulla, la formula di Boltzmann richiede che W sia maggiore di uno (il logaritmo di 1 infatti è zero e W non può essere minore di uno, poiché corrisponde al numero di stati microscopici). In effetti, ad esempio, il numero di microstati previsto per un buco nero con la massa del Sole è esorbitante: 10 elevato alla 10 elevato alla 77! Però nella descrizione classica dei buchi neri secondo la teoria della relatività generale non vi è nessuna traccia di microstati.

b.
Illustrazione artistica dei dintorni
del buco nero supermassiccio nella
galassia NGC 3783.





c.
Rappresentazione semplificata del processo di emissione della radiazione di Hawking: in prossimità dell'orizzonte degli eventi, le fluttuazioni quantistiche possono creare una coppia particella-antiparticella, di cui una può raggiungere l'infinito ed essere rivelata come radiazione, mentre l'altra viene assorbita nel buco nero.

Il problema si infittisce alla luce del celebre risultato di Stephen Hawking, che ha mostrato che i buchi neri non sono del tutto “neri”, ma che emettono una radiazione termica, come ogni corpo macroscopico a una temperatura superiore allo zero assoluto, chiamata in suo onore *radiazione di Hawking*. Nel caso dei buchi neri ciò avviene perché, in prossimità dell'orizzonte degli eventi, le fluttuazioni quantistiche possono creare una coppia di particelle, di cui una può raggiungere l'infinito ed essere rivelata come radiazione, mentre l'altra viene assorbita nel buco nero. Attraverso questo meccanismo il buco nero perde massa, che viene trasportata al di fuori dalle particelle emesse, e poco alla volta “evapora”. L'aspetto cruciale del calcolo di Hawking è catturato dalla forma dello stato quantistico che descrive la coppia prodotta: questa costituisce uno stato *entangled* (vd. in *Asimmetrie* n. 16 p. 36, ndr), in cui lo stato della particella uscente è correlato con quello della particella che cade nel buco nero. L'estrapolazione di questo risultato allo stadio finale dell'evaporazione del buco nero è paradossale: infatti, ciò che resta è la sola radiazione uscente, che, non può più essere correlata con nulla, dato che il buco nero è scomparso. Di conseguenza, non si può attribuire alla

radiazione emessa uno stato quantistico definito, ma solo assumere che essa possa trovarsi in un numero grande di stati possibili, associato, dalla formula di Boltzman, a un'entropia. Questa entropia non è che un'altra manifestazione della misteriosa entropia di Bekenstein, e la soluzione del paradosso di Hawking non può dunque prescindere dalla comprensione di tale entropia e dei microstati a essa associati.

Negli anni questo rompicapo si è rivelato sorprendentemente ostico e stimolante. Recentemente, soprattutto grazie alle osservazioni di Samir Mathur, sono state

isolate le alternative possibili per evitare il paradosso: o nuovi effetti introducono inaspettate correlazioni tra l'interno e l'esterno dell'orizzonte o si modifica la natura *entangled* della coppia di particelle emessa. Questa seconda ipotesi è possibile solo al prezzo di modificare drasticamente la geometria dell'orizzonte di un buco nero rispetto a quella predetta dalla relatività generale. Quale sia la natura di queste modifiche è ancora oggetto di aperto dibattito: forse l'orizzonte non è un luogo pacifico, come Einstein ci farebbe pensare, ma è circondato da un muro di fuoco (vd. in *Asimmetrie* n. 14 p. 35, ndr).

Biografia

Stefano Giusto è professore nel dipartimento di Fisica e Astronomia dell'Università di Padova. Dopo aver conseguito il dottorato presso l'Università di Genova, ha ricoperto incarichi di ricerca presso varie istituzioni italiane e internazionali, tra cui la Ohio State University, dove ha lavorato con il prof. S. Mathur sul problema dell'informazione nei buchi neri.

Link sul web

<http://www.eoht.info/page/S+%3D+k+ln+W>

<http://www.physics.ohio-state.edu/~mathur/infopublic/main.html>

<http://profmattstrassler.com/articles-and-posts/relativity-space-astronomy-and-cosmology/black-holes/black-hole-information-paradox-an-introduction/>

[as] con altri occhi

Prestato alla scienza.

di Tuono Pettinato

fumettista, autore di OraMai (Comics&Science)



[as] radici

Figure vs. equazioni.

di Lucio Russo

matematico e storico della scienza

È diffusa la tendenza a concentrarsi, nello studio delle culture del passato, sugli elementi nei quali possano riconoscersi i precedenti o gli embrioni di strutture concettuali tuttora usate. Questa tendenza è ovviamente comprensibile e anche utile, ma rischia di nascondere gli elementi peculiari della cultura che si vuole studiare, che spesso aveva esplorato strade alternative a quelle prevalse

successivamente. Nel caso del rapporto tra le equazioni e la matematica greca, che certamente non le usava nella forma che oggi ci è abituale, invece di esplorare i precedenti (che pure esistono) delle nostre formulazioni algebriche, mostriamo con un esempio come fosse naturale, per un matematico greco, risolvere per altra via problemi che noi risolveremmo con un'equazione.



a.
Particolare dell'affresco di Raffaello
"La Scuola di Atene" (Musei
Vaticani), in cui è raffigurato Euclide
con i suoi discepoli.

Supponiamo di avere disegnato (su un foglio o sul terreno) un rettangolo (in azzurro in fig. b) e di voler disegnare il lato di un quadrato ad esso equivalente (il quadrato giallo in fig. b). Uno studente di oggi con ogni probabilità risolverebbe il problema nel modo seguente:

- 1) misurerebbe i lati del rettangolo rispetto a un'unità di misura scelta, ottenendo due numeri: a e b ;
- 2) detto x il lato cercato del quadrato, dall'eguaglianza tra le aree del rettangolo e del quadrato ricaverebbe l'equazione $ab = x^2$;
- 3) risolverebbe l'equazione precedente, ottenendo il valore di x come radice quadrata del prodotto di a per b ;
- 4) eseguirebbe le due operazioni numeriche (moltiplicazione e radice quadrata) ottenendo un valore (approssimato) di x ;
- 5) disegnerebbe un segmento sufficientemente lungo;
- 6) aiutandosi con un righello graduato o un altro strumento di misura, staccerebbe sul segmento un tratto di lunghezza x .

Vediamo ora come lo stesso problema è risolto da Euclide (nella proposizione 14 del secondo libro degli *Elementi*).

Sia ABCD il rettangolo dato. Euclide compie le operazioni seguenti (vd. fig. b):

- 1) prolunga il lato BC;
- 2) centrando un compasso nel punto C, individua sul prolungamento di BC il punto E tale che $CE = CD$;
- 3) disegna una semicirconferenza di diametro BE;
- 4) prolunga il lato DC fino a incontrare la semicirconferenza nel punto F.

Il segmento FC è il lato cercato di un quadrato equivalente al rettangolo ABCD (infatti, essendo il triangolo BFE rettangolo in F, per un noto teorema, l'altezza relativa all'ipotenusa è media proporzionale tra le proiezioni del cateti sull'ipotenusa, ossia tra i due lati del rettangolo dato).

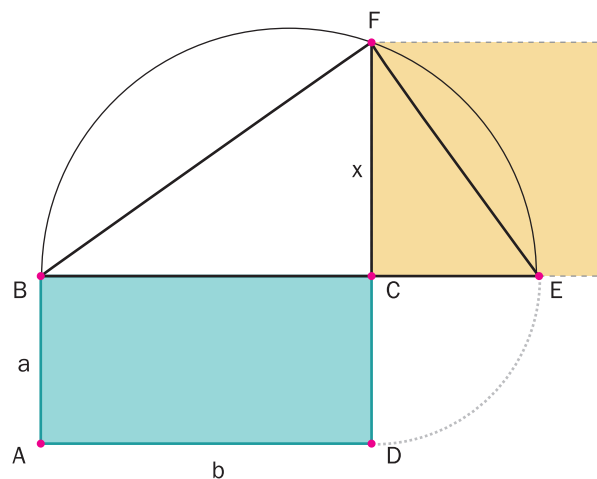
La soluzione di Euclide richiede molte più conoscenze geometriche di quella moderna, ma evita completamente non solo l'idea di equazione, ma anche le due misurazioni con le quali lo studente moderno trasformerebbe il problema geometrico in uno numerico per poi ritrasformare il risultato

numerico in un dato geometrico. Il procedimento euclideo non richiede la scelta di un'unità di misura, né l'uso di strumenti di misura; può essere eseguito su un campo piano usando semplicemente corde tese. Si tratta quindi indubbiamente di un procedimento più semplice. Per cogliere la sua semplicità occorre però liberarsi dall'abitudine, in noi profondamente radicata, di tradurre ogni problema in un problema numerico, usando le figure geometriche solo come illustrazioni simboliche.

Procedimenti geometrici analoghi a quello visto nell'esempio potevano essere usati per risolvere vari problemi che oggi sono associati a equazioni algebriche: ad esempio, dati tre segmenti, si poteva trovarne il quarto proporzionale; oppure si poteva trovare il segmento che rappresentava la soluzione di un problema che noi enunceremmo come la ricerca della soluzione di una generica equazione di secondo grado.

I matematici greci preferivano talmente i metodi geometrici a quelli numerici che, quando era necessario, operavano la trasformazione inversa a quella cui siamo abituati: traducevano cioè in termini geometrici anche i problemi numerici. In questo caso non vi è dubbio che il procedimento moderno sia più efficiente. Inoltre le moderne equazioni sono utili per ricavare molte grandezze (in particolare fisiche) di natura non geometrica. Il metodo antico era tuttavia molto efficiente per risolvere i problemi geometrici tipici dell'epoca.

Ci si può chiedere perché in epoca moderna i metodi numerici e algebrici prevalsero su quelli geometrici, dando un ruolo così importante alle equazioni. Il ribaltamento del rapporto tra i due metodi avvenne essenzialmente nel XVII secolo e fu in larga misura una conseguenza dell'introduzione delle tavole dei logaritmi (apparso per la prima volta nel 1614), che resero enormemente più efficienti i calcoli numerici. Compilare tavole di logaritmi richiede in effetti una grande quantità di lavoro, che non ha senso compiere se il mercato formato dai potenziali utilizzatori delle tavole è inferiore a una soglia che probabilmente fu raggiunta solo nell'Europa moderna.



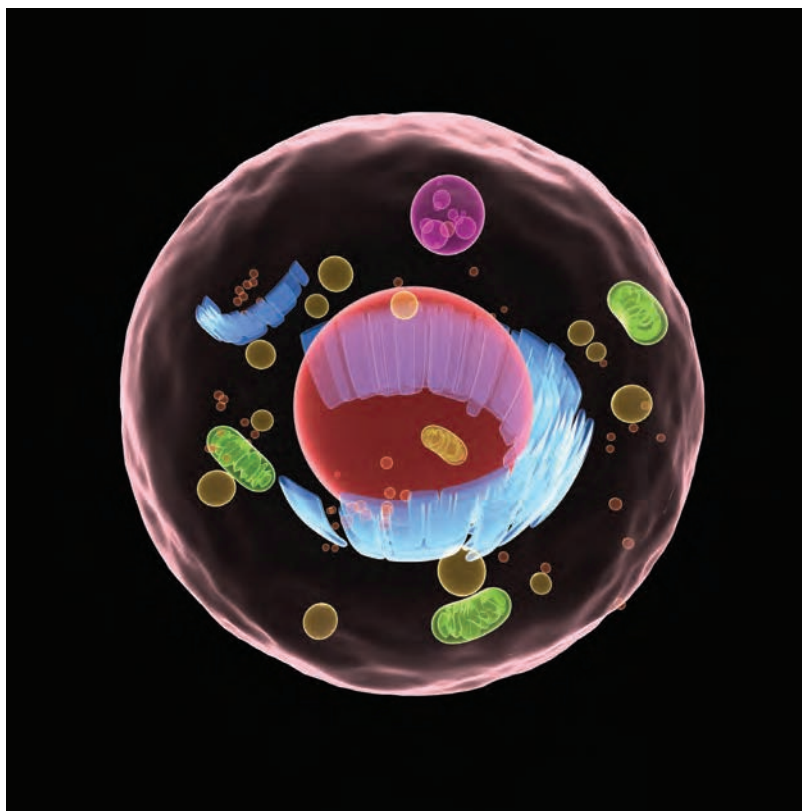
b.
Visualizzazione del procedimento per trovare il quadrato (in giallo) equivalente a un rettangolo dato (in azzurro), sia con un'equazione che senza.

[as] intersezioni

Biologia fuori legge.

di Edoardo Boncinelli

biologo molecolare



a.
Illustrazione artistica di una cellula animale.

La fisica possiede i suoi principi e le sue leggi di validità universale. La biologia no. Questa è una cosa che non può non colpire, soprattutto quelli che, come me, sono passati dalla fisica alla biologia. Io ritengo che la vita, cioè l'oggetto della biologia, non sia che un capitolo della fisica: una fisica delle temperature relativamente basse e costanti e luogo di processi metabolici che implicano dislivelli di energia contenuti, grazie alla chimica dei numerosi composti organici del carbonio. Questo almeno sulla nostra Terra, ma di altre forme di vita non si ha conoscenza. So che non tutti sono d'accordo con questa posizione, ma io non vedo alternative, almeno se non si prende in considerazione il fenomeno della coscienza soggettiva.

Affrontare i problemi della biologia equivale ad avere a che fare con eventi che obbediscono alle stesse leggi della fisica e della chimica, eventi nei quali, però, dominano le condizioni al contorno. Quest'ultime sono importanti anche nella fisica, ma sono, per così dire, concettualmente meno rilevanti delle leggi. In biologia no. Qui le condizioni al contorno, incluse le condizioni iniziali, sono fondamentali, soprattutto quelle "incarnate" in una cellula di partenza e/o in un genoma di partenza. Le leggi, infatti, porterebbero a risultati molto diversi se applicate a una cellula e/o a un genoma, piuttosto che ad altri. Questa "tirannia" delle condizioni iniziali porta il biologo a parlare di "storie naturali", tante e diverse, piuttosto che di "processi".

Le cellule direttamente discendenti da un'unica cellula iniziale, e in possesso dello stesso genoma, costituiscono un organismo, unicellulare o pluricellulare, che è fisicamente separato da tutti gli altri. Questo organismo è la sede di una molteplicità di processi chimico-fisici altamente controllati, regolati in ultima analisi dalle istruzioni contenute nel proprio genoma, anche se in relazione ad alcuni eventi dell'ambiente circostante. Quasi tutti questi processi sono molteplicemente modulati, in modo che il venir meno di una forma di controllo non ne altera necessariamente l'andamento. La relativa stabilità metabolica che ne consegue preserva, *in primis*, l'identità dell'organismo stesso e, a più lungo termine, la fissità del messaggio genetico contenuto nel genoma che lo caratterizza. Stabilità e continuità sono le caratteristiche di tutti i processi biologici, talvolta anche al di là della vita dell'organismo nel quale hanno sede. Di tanto in tanto, infatti, gli organismi, siano essi unicellulari o pluricellulari, si replicano, e lo fanno sulla base della propria storia individuale e di discendenza genetica, mentre con il tempo tutti gli organismi individuali muoiono, cioè si ritirano dal ciclo degli eventi che li hanno visti protagonisti.

La replicazione delle proprie cellule prima e degli organismi poi, se questi ultimi sono pluricellulari, implica la continuità informazionale del loro genoma e, in parte, la continuità fisica di almeno una cellula portatrice del suddetto genoma. Questa doppia continuità di eventi leggermente sfalsati nel tempo – alcune parti della cellula che assicura la continuità possono non essere, e in genere non sono, costruite sulla base delle istruzioni contenute nella copia fisica di genoma che essa contiene – è, secondo me, proprio la garanzia della continuità fra generazioni cellulari e generazioni di individui.

Pur in ottemperanza a tutte le leggi della fisica e della chimica che sono in gioco, quindi, le entità della biologia sono oggetti eminentemente storici: quello che conta davvero è la loro discendenza, anche quando per eventi accidentali possono subire un'alterazione più o meno pronunciata del loro genoma, per esempio a causa di una mutazione. È la storia di tutti i singoli viventi che conta, e la storia delle storie è rappresentata da quella che viene chiamata usualmente *storia evolutiva* oppure, con una grossa semplificazione, *evoluzione dei viventi*. Le poche regolarità che talvolta vengono chiamate "leggi biologiche" riguardano, infatti, i processi di replicazione e l'evoluzione degli organismi nel tempo. Come dire, il centro vitale delle scienze della vita.

b.

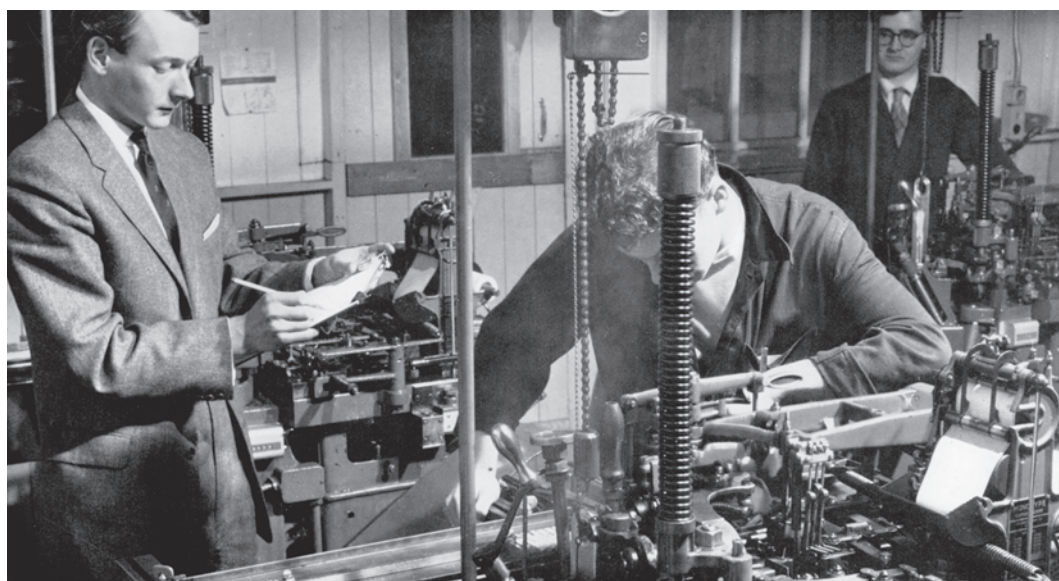
Prima che una cellula si divida, per garantire stabilità e continuità nella trasmissione delle informazioni genetiche, il Dna duplica se stesso (la doppia elica in alto). Cambia così il suo aspetto, assumendo una forma compatta. È il cromosoma (la "X" in basso), che durante la divisione garantisce una corretta ripartizione del Dna nelle nasciture cellule figlie.



[as] riflessi

Equazioni di piombo.

di Eleonora Cossi



a.
Persone al lavoro su una Monotype.

In principio era il piombo. Le mani esperte di un tipografo montatore che allineavano caratteri, che componevano parole che andavano a costituire righe che formavano poi un testo completo pronto per essere stampato. Fin dalla sua nascita, la stampa moderna, inventata da Johannes Gutenberg che per primo, almeno in Occidente, ideò e sperimentò i caratteri mobili, è stata caratterizzata dall'innovazione tecnologica, che l'ha trasformata nel corso dei secoli attraverso lo sviluppo di nuove macchine e tecniche di composizione tipografica. Ma nelle stamperie, oltre ai testi religiosi e letterari, si sono da sempre prodotte anche opere scientifiche: testi che contenevano equazioni e formule e dunque esponenti, deponenti, linee di frazione e altri caratteri difficili da allineare e comporre, che richiedevano mani esperte e tecnologie spesso costose. Generazioni di studenti di facoltà scientifiche hanno incontrato problemi analoghi

e hanno scritto i propri lavori, prima, con macchine da scrivere portatili, come la mitica Lettera 22 della Olivetti, battendo cautamente numeri e linee sui tasti e spostando con estrema attenzione in su e in giù il rullo di carta con la manopola, e poi al computer, usando linguaggi specifici per le formule matematiche come TeX, Metafont e LaTeX. Nomi sconosciuti ai colleghi umanisti. Dario Cimaglia lavora da anni nel campo della stampa tipografica e dell'editoria. Oggi ha una società di servizi editoriali, che ha sede nel quartiere tiburtino, una delle aree della capitale che più si è trasformata e innovata negli ultimi anni. E tecnologia e trasformazione sono appunto anche le parole chiave dell'evoluzione della tipografia, settore che è stato completamente rivoluzionato dall'ingresso nel mercato di nuove macchine. "Nell'800 la rivoluzione tecnologica industriale aveva portato a sviluppare la Linotype, la prima

b.

Dario Cimaglia da anni lavora nel campo della stampa tipografica e dell'editoria. Oggi ha una società di servizi editoriali a Roma, la Plan.ed.



macchina che componeva le righe di testo in piombo, inventata nel 1886 da Ottmar Mergenthaler – ci racconta Cimaglia – Prima della Linotype il processo di stampa consisteva nell'assemblare manualmente ogni parola, carattere per carattere e in senso inverso. La Linotype meccanizzò questo processo, fondendo in metallo righe intere di scritto che venivano digitate su una tastiera meccanica da un operatore specializzato. Le linee di testo venivano assemblate per formare una pagina che poi veniva stampata”.

Questa macchina fu una vera rivoluzione per l'editoria e per la diffusione dei giornali.

Installata per la prima volta al New York Tribune nel luglio 1886, consentì di passare dai 1000 caratteri, fino ad allora tradizionali, a circa 8000-10.000. Per l'editoria scientifica però questo sistema aveva grossi limiti.

“La Lynotype ha rappresentato un salto tecnologico notevole, in particolare per la rapidità con cui si poteva andare in stampa – continua Cimaglia – Ma c'erano degli inconvenienti. Essendo una macchina che compone una riga per volta, per correggere un errore era necessario riscrivere l'intera riga. Un'operazione costosa. Inoltre, la riga non consentiva di mettere esponenti o deponenti. Insomma, tagliava fuori le formule matematiche”. La soluzione per i testi

scientifici era una macchina per la composizione meccanica chiamata Monotype, inventata sempre nell'800, ma meno diffusa perché più lenta della Linotype. Usando sempre la tecnica della fusione a caldo con il piombo, la Monotype fondeva una lettera alla volta e consentiva, oltre a una maggiore precisione, di comporre formule ed equazioni, poiché era possibile posizionare i caratteri uno alla volta. “Nell'editoria scientifica la Monotype è stata usata per decenni, anche dopo l'introduzione della composizione al computer negli anni '70. Ancora all'inizio degli anni '80 ho curato un libro di fisica con molte formule ed equazioni: *Lezioni di fisica*, di Carlo Bernardini e Silvia Tamburini. Sono dovuto arrivare fuori Roma in un borgo vicino a Tivoli che si chiama Castelmadama, dove c'era una tipografia che componeva ancora in Monotype. Una delle pochissime in grado di fare questo tipo di lavorazione!”, conclude Cimaglia.

La composizione di testi scientifici cambierà radicalmente solo con l'informatica e con la diffusione di programmi evoluti di impaginazione, come per esempio QuarkXPress o Adobe InDesign, che prevedono caratteri pensati per stampare le formule e hanno semplificato enormemente l'editoria scientifica. Nonostante ciò una minoranza nostalgica non riesce proprio a separarsi dal LaTeX!

[as] traiettorie

I conti con le parole.

di Davide Patitucci



“Da fisico computazionale traducevo le equazioni in programmi, ora uso algoritmi per analizzare parole”. È tutto in questa frase l’insolito percorso compiuto da un giovane fisico teorico di Treviso, Davide Cadamuro. Una traiettoria che, partendo dallo studio del cosmo, lo ha portato ad avventurarsi nei meandri del web profondo. Tesi a Padova in astrofisica delle particelle, dottorato al Max-Planck-Institut für Physik di Monaco e poi il cambio di rotta e l’approdo alla linguistica computazionale. Un settore nuovo e in grande sviluppo, nato dalla necessità di districarsi all’interno dell’immensa mole di dati del web, nel tentativo di rendere il linguaggio di comunicazione con un computer il più simile possibile a quello parlato (vd. *Asimmetrie* n.13, p. 40).

[as]: Come mai hai deciso di lasciare la fisica e il mondo della ricerca?

Davide [D]: Mi sono reso conto che non ero portato per la ricerca. Nella fisica delle particelle, ad esempio, spesso accade di risolvere i problemi, ipotizzando l’esistenza di nuove particelle. Solo che esistono molte più soluzioni che problemi. Ecco, forse mi manca quel pizzico di curiosità intellettuale in più, che mi sproni a indagare se queste particelle predette possano rappresentare la soluzione anche ad altri problemi oltre i quali erano state originariamente proposte, ad esempio in astrofisica o cosmologia.

[as]: E quindi sei approdato alla linguistica computazionale, che studia la lingua attraverso la matematica. Come ci sei arrivato?

[D]: La mia passione per la programmazione è nata ai tempi dell’università. Ma l’approdo alla linguistica computazionale è stato casuale. Alla fine del dottorato dovevo scegliere se

continuare la carriera scientifica. Ho deciso, però, di tentare la strada del programmatore, e il caso ha voluto che iniziassi a lavorare in un’azienda che si occupava proprio di questo settore. È stata una cosa completamente inaspettata.

[as]: Poi però ci hai preso gusto... Cosa ci fa un fisico teorico in questo campo di studi?

[D]: Come fisico teorico, in realtà, sono stato avvantaggiato. Un fisico, infatti, è allenato a studiare e imparare in fretta, e ha una grande capacità di analisi. Ci sono anche punti in comune tra il modo di agire di un fisico e di un linguista computazionale. In fisica, infatti, si cerca di formulare ipotesi sul funzionamento della natura, confrontando le predizioni dei modelli teorici con i dati sperimentali. In pratica, a partire dai dati sperimentali si cerca una legge, una teoria che permetta di scrivere un’equazione per spiegare questi dati. Anche in linguistica computazionale mi sono trovato a cercare una regolarità nei dati, intesi in questo caso come testi o conversazioni. In un certo senso, le grammatiche locali e le espressioni regolari possono essere considerate alla stregua di equazioni, i cui termini sono parole nel primo caso e caratteri tipografici nel secondo.

[as]: Come vivi questa nuova esperienza?

[D]: Un po’ come se stessi facendo un secondo dottorato: ogni giorno imparo cose nuove! La linguistica computazionale è una disciplina in grande espansione. Internet è ovunque, per qualunque cosa si “chiede” a Google. Per accedere alle informazioni che il web offre, c’è bisogno di algoritmi di ricerca sempre più efficienti e raffinati. Un giorno le macchine saranno in grado di comprendere il linguaggio umano, e mi sto convincendo sempre più che quel giorno non è poi così lontano.

[as] spazi

Scienza al mercato.

di Vincenzo Napolano



a.
Il banco dell'Infn nel mercato di Balduina ad aprile.

Portate degli scienziati al mercato di sabato mattina a Roma. Non a fare la spesa, ma dalla parte del bancone a raccontare cosa fanno in laboratorio. Aggiungete l'entusiasmo degli studenti delle scuole superiori che spiegano agli avventori elementi di chimica, l'evoluzione delle specie o addirittura la teoria inflazionaria sull'origine dell'universo. E infine immaginate che le signore venute a fare la spesa, le famiglie e i ragazzini formino capannelli tra le verdure e il pesce per affacciarsi a questi insoliti banchi di scienza. È quello che è successo in tre mercati rionali di Roma (quelli dei quartieri Flaminio, Bologna e Balduina) il 28 marzo, l'11 e il 18 aprile scorsi, grazie a *La Scienza tra i banchi del mercato*. Un'iniziativa lanciata e coordinata dall'Osservatorio Scienza per la Società del II° Municipio della capitale e dal Cnr, che ha raccolto l'adesione di decine di associazioni per la divulgazione e comunicazione scientifica, delle Università Sapienza e Tor Vergata e di

enti di ricerca come l'Infn e l'Enea, oltre alla partecipazione del Liceo scientifico e Istituto tecnico B. Pascal e della scuola secondaria G. G. Belli. "Iniziativa come questa – spiega Emilia La Nave, assessore del II° Municipio di Roma e ricercatrice dell'IsC-Cnr – centrano un duplice obiettivo: rianimano dei luoghi centrali per la nostra città, come i mercati rionali, e permettono alle persone di incontrare la scienza, intesa come conoscenza, ma anche come persone che la producono, in modo semplice e quotidiano". Così, mentre gli studenti del Belli propongono agli avventori del mercato dei test olfattivi, un ricercatore dell'università realizza modelli di atomi e molecole con kiwi, pomodorini, mele, carote... E i fisici dell'Infn raccontano sulla piazza del mercato come le particelle elementari corrono nell'acceleratore Lhc, con l'aiuto di simulazioni virtuali e dell'immaginazione di chi ascolta. E sono solo alcuni esempi delle decine di proposte di scienza e divulgazione che per qualche ora hanno

trasformato e colorato i mercati rionali. "In effetti, l'idea poteva sembrare strampalata – commenta Giordana Castelli del Cnr e coordinatrice scientifica del progetto – In realtà è servita a collegare e far emergere una rete di competenze ed eccellenze della nostra città, che solitamente è sommersa. E a rispondere a un'esigenza incontenibile dei nostri concittadini, delle persone comuni, di avvicinarsi alla scienza in modo informale e diretto". Un'iniziativa che gli organizzatori vorrebbero replicare anche in futuro, come miscuglio divertente e insolito tra il nutrimento del corpo e quello della mente. "E che magari anche altre città e altre scuole in giro per l'Italia potrebbero riprendere – si augura Emilia La Nave – ripetendo un esperimento didattico dal successo assicurato: quello in cui i ragazzi stessi propongono nuove idee ed esperienze ai loro coetanei, ma anche agli adulti, in un contesto pubblico e diverso dalla scuola". Provare per credere.

[as] illuminazioni

Rivelatori fai da te.

Assemblare a scuola o a casa un vero rivelatore di particelle con tanto di sistema di acquisizione, come quelli funzionanti in questi giorni al Cern di Ginevra, può diventare un gioco da ragazzi.

Questo grazie alla scheda *Arduino Shield "Ardusipm"*, sviluppata per esigenze sperimentali reali nella sezione di Roma dell'Infn, e al suo software. Con materiali reperibili in rete è possibile costruire un rivelatore di particelle con annessa elettronica e sistema di acquisizione dati, che nulla ha da invidiare ai suoi fratelli maggiori funzionanti in Lhc (vd. in *Asimmetrie* n. 8 p. 24, ndr).

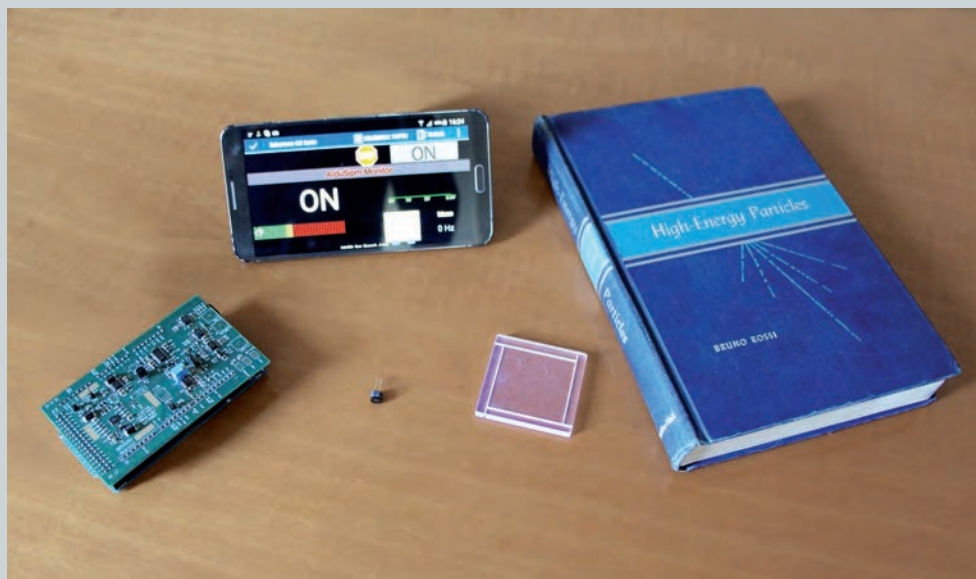
Il progetto proposto può essere realizzato usando un *Arduino Due* (<https://www.arduino.cc/>), una piattaforma elettronica *open-source* pensata per chiunque voglia sviluppare progetti interattivi. Sono necessari soltanto altri tre componenti: un *Ardusipm*, un *fotomoltiplicatore* e uno *scintillatore*. I dati raccolti da uno o più rivelatori potranno essere condivisi tramite wi-fi su una piattaforma social visibile su internet o visualizzati da uno smartphone, un tablet o un Pc. Vediamo in dettaglio di che cosa si tratta.

Uno dei compiti principali dei rivelatori di particelle è registrare il passaggio di particelle, come elettroni, muoni, fotoni ecc. Tra i sistemi di rivelazione possibili è stato scelto quello che utilizza la proprietà di alcuni materiali di *scintillare*, ossia di emettere deboli quantità di luce quando

vengono attraversati dalle particelle. La luce emessa viene convertita in segnale elettrico tramite un fotomoltiplicatore. I fotomoltiplicatori, ancora in uso, sono oggetti costosi costituiti da un tubo di vetro fragile e ingombrante e che per funzionare hanno bisogno di tensioni di qualche migliaio di Volt. Grazie all'evoluzione tecnologica alla fine degli anni '90 sono stati sviluppati dei fotomoltiplicatori a stato solido, chiamati Sipm (*Silicon Photo Multiplier*), molto più piccoli dei loro progenitori (appena qualche millimetro), che funzionano con tensioni di poche decine di Volt e che costano qualche decina di euro (a confronto delle migliaia di euro di quelli tradizionali).

L'esperimento che vi proponiamo è di accoppiare un Sipm a uno scintillatore, e "osservare" la luce prodotta al passaggio dei raggi cosmici, particelle cariche – principalmente muoni – che raggiungono continuamente la Terra. Niente vieta, utilizzando scintillatori opportuni, di rivelare altre particelle come fotoni gamma o neutroni prodotti dalla radioattività ambientale o artificiale, trasformando il sistema in un rivelatore di radiazioni nucleari.

In sintesi, il sistema sopra descritto consente di avere uno strumento compatto, non fragile, con bassi consumi e che non necessita di un computer sempre acceso per funzionare. La struttura proposta replica in piccola scala tutte le componenti degli "esperimenti veri". [Valerio Bocci]



Le istruzioni per l'acquisto dei materiali e il montaggio del rivelatore di particelle possono essere consultate su www.asimmetrie.it/index.php/as-illuminazioni-rivelatori-fai-da-te.

**I laboratori dell'Istituto Nazionale
di Fisica Nucleare sono aperti alle visite.**

I laboratori organizzano, su richiesta
e previo appuntamento, visite gratuite
per scuole e vasto pubblico.

La visita, della durata di tre ore circa,
prevede un seminario introduttivo
sulle attività dell'Infn e del laboratorio
e una visita alle attività sperimentali.

Per contattare
i laboratori dell'Infn:

Laboratori Nazionali di Frascati (Lnf)

T + 39 06 94032423
/ 2552 / 2643 / 2942
sislnf@lnf.infn.it
www.lnf.infn.it

Laboratori Nazionali del Gran Sasso (Lngs)

T + 39 0862 4371
(chiedere dell'ufficio prenotazione visite)
visits@lngs.infn.it
www.lngs.infn.it

Laboratori Nazionali di Legnaro (Lnl)

T + 39 049 8068342 356
direttore_infn@lnl.infn.it
www.lnl.infn.it

Laboratori Nazionali del Sud (Lns)

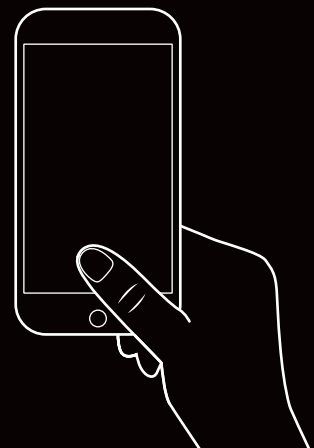
T + 39 095 542296
sislns@lns.infn.it
www.lns.infn.it

www.infn.it



Sul sito **www.asimmetrie.it**
vengono pubblicate periodicamente
notizie di attualità scientifica.

Asimmetrie è anche una app,
ricca di nuovi contenuti multimediali.





www.infn.it

rivista online
www.asimmetrie.it