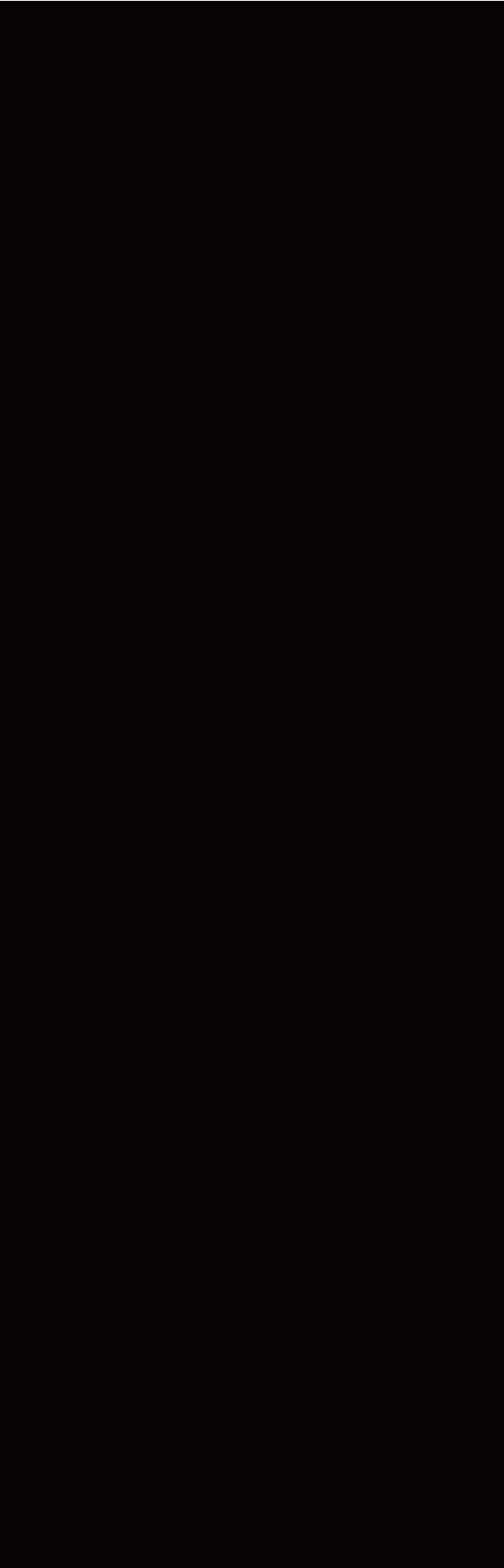


[infinito]

anno 11 numero **20** / 4.16

asimmetrie

rivista semestrale dell'Istituto
Nazionale di Fisica Nucleare



asimmetrie

Cari lettori di Asimmetrie,

La finzione non regge. Se pensiamo di aver capito l'infinito, solo perché con più o meno fatica abbiamo conseguito una laurea in fisica, temo che stiamo mentendo a noi stessi. Il nostro incontro con questo concetto matematico può essere avvenuto in circostanze diverse. Poetiche forse, "interminati spazi di là da quella (siepe)". Oppure quando ci fecero riflettere sulla domanda se ci fossero più numeri naturali di quanti numeri pari (o dispari) o quando, guardando il cielo in una notte stellata, invece di pensieri romantici, ci viene da chiederci dove siano i confini del cosmo, che invece incomprensibilmente non esistono.

Con l'infinito l'umanità ha tentato a lungo e inutilmente di cimentarsi. La rivoluzione è quella di Georg Cantor, che disse che "se si vuole operare con l'infinito, bisogna accettare l'esistenza di tanti infiniti...". E qui inizia l'avventura. In questo numero si vuole tentare di spiegare come la fisica provi a fare i conti con l'infinito, imparando a convivere e riuscendo talvolta a farlo sparire.

Buona lettura.

Fernando Ferroni
presidente Infn



asimmetrie

Rivista dell'Istituto Nazionale
di Fisica Nucleare

Semestrale, anno 11,
numero 20, aprile 2016

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

Davide Patitucci
Francesca Cuicchio
(infografica)

hanno collaborato

Amedeo Balbi, Claudio Bernardi,
Concezio Bozzi, Eleonora Cossi,
Giulio Giorrello, Vincenzo Greco, Luca
Griguolo, Antonio Masiero, Vincenzo
Napolano, Massimo Passera, Sarah
Recchia, Nadia Robotti, Francesca
Scianitti, Francesco Vissani e la
classe 4°G del Liceo Scientifico
Leonardo da Vinci di Firenze, a.s.
2014/15

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 Infn.

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 aprile 2016.
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 20 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 ©everett225 (depositphotos) //
foto p. 4 ©unlim3d (123RF); fig. a p. 5
©Asimmetrie-Infn; foto b p. 6 ©Wikipedia/Ad
Meskens; foto c p. 7 ©Philippe Halsman/
Magnum Photos; fig. d p. 8 ©Asimmetrie-Infn;
foto e p. 9 ©Cern // foto a p. 10 ©AIP Emilio
Segre Visual Archives; fig. b, c pp. 11-12
©Asimmetrie-Infn // foto a p. 13 ©Cern; foto b
p. 14 ©AIP Emilio Segre Visual Archive; fig. c
p. 15 ©Asimmetrie-Infn // foto b p. 17 ©Nasa;
foto c p. 18 ©Rosanna e Daniele Regge //
foto a p. 19 ©Wikimedia/Sailko; foto b p. 20
©AIP Emilio Segre Visual Archives, Nina
Courant Collection // fig. p. 21 ©Asimmetrie-
Infn; fig. c p. 23 ©Asimmetrie-Infn; fig. d p. 24
©Asimmetrie-Infn // foto a p. 25 ©F. Cuicchio/
Asimmetrie-Infn // foto a p. 27 ©Mike Walker;
fig. b p. 28 ©Asimmetrie-Infn; foto c p. 29
©Volker Steger // foto a p. 30 ©Cern; fig. b, c,
1 pp. 31-33 ©Asimmetrie-Infn // fig. b p. 35
©Asimmetrie-Infn // foto p. 36 ©Science
Photo Library /AGF; foto b p. 37 ©Johann137-
Wikimedia Commons; fig. c p. 38
©Asimmetrie-Infn; fig. d p. 39 ©NIST/JILA/CU-
Boulder - NIST Image // foto a p. 40
©Deutsches Museum, Bildstelle; fig. b p. 41
©Asimmetrie-Infn // foto a, b pp. 42-43 ©Cern
// foto a, b pp. 44-45 ©Pint of Science // fig.
p. 48 ©Asimmetrie-Infn.

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

as

20 / 4.16 [infinito]

Dividere per zero di Antonio Masiero	4	[as] riflessi Tutto in un click. di Vincenzo Napolano	34
L'infinito sotto il tappeto di Massimo Passera	10	Oltre i limiti di Vincenzo Greco	36
La gravità gravita di Luca Griguolo	13	[as] radici Una catastrofe evitata. di Nadia Robotti	40
Infinito, che passione di Tullio Regge	16	[as] selfie Particelle in webcam. di LE04G	42
Una tentazione affascinante di Claudio Bernardi	19	[as] spazi Una pinta di scienza. di Francesca Scianitti	44
Senza confini di Amedeo Balbi	21	[as] traiettorie Mosca express. di Eleonora Cossi	46
[as] intersezioni Liberare il mondo. di Giulio Giorello	25	[as] A spasso per i laboratori.	47
Da qui all'eternità di Sarah Recchia e Francesco Vissani	27	[as] illuminazioni Sfide.	48
Per qualche sigma in più di Concezio Bozzi	30		

Dividere per zero

L'infinito e oltre

di Antonio Masiero



1 diviso 0, una grande lavagna nera, un perentorio ordine del maestro: “Cancella subito, hai scritto un’operazione impossibile, perché non c’è nessuna soluzione, il risultato sarebbe l’‘infinito’ che non è un numero!”.

Fascino di soglia invalicabile, di mela proibita, dalla quale si è attirati e respinti al tempo stesso – tutto questo e molto di più da sempre accompagna la nostra mente nell’esplorazione dei molteplici aspetti dell’infinito.

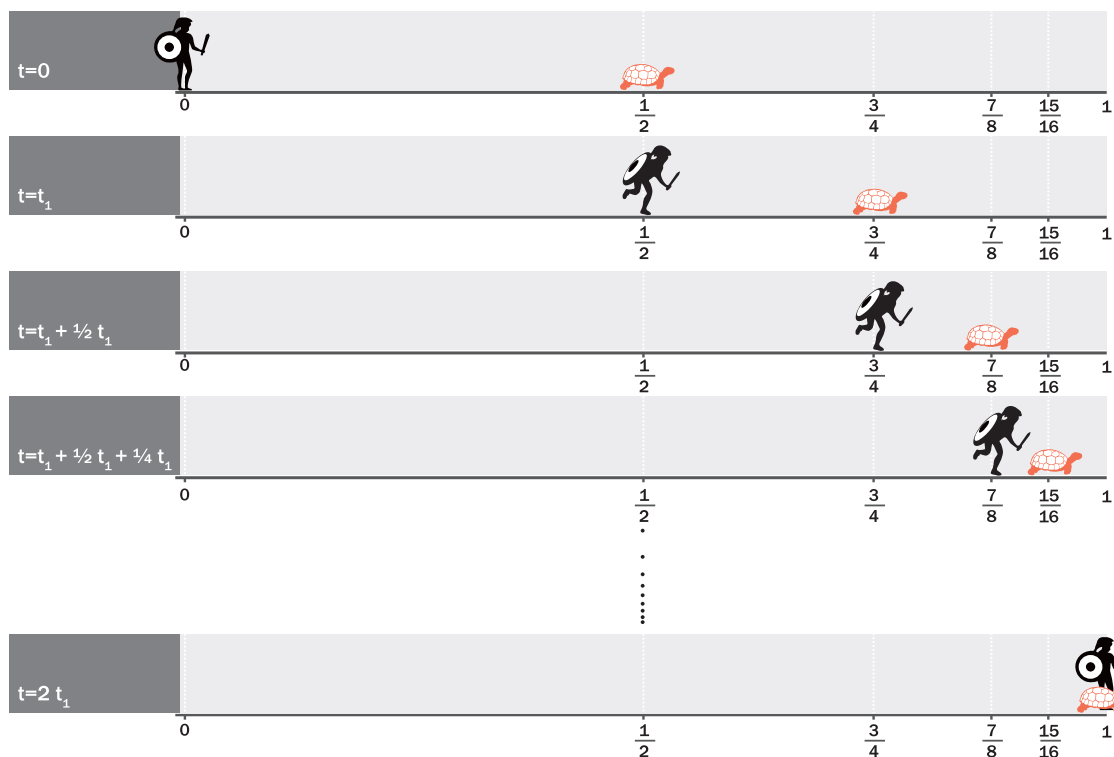
A partire dalla matematica (vd. p. 19, ndr). 1,2,3,4,... c’è sempre un numero intero più grande. Veniamo così a contatto con un insieme di numeri che contiene infiniti elementi. Dai numeri passiamo alla geometria: Euclide ci parla di rette parallele che non si incontrano, in uno spazio che d’improvviso, nella mente, si allarga dallo spazio finito che percepiamo attorno a noi per diventare un infinito contenitore di figure geometriche idealizzate. Ma ancor più profondo e meraviglioso nel mondo greco è l’accostamento dell’infinito a quello che oggi chiamiamo “zero”, in una costante tensione tra il continuo e il discreto che, come vedremo, prosegue sino ai giorni nostri: Achille continua incessantemente a dimezzare la sua

distanza dalla tartaruga, ma, per quante volte ripeta l’operazione di dimezzamento, non riesce a ridurre a zero la distanza, cioè a raggiungere il lento animale (vd. fig. a). Così pure la freccia non arriverebbe mai a colpire il suo bersaglio.

E ancora, nel mondo greco questo gioco tra zero e infinito riappare con accenti modernissimi nell’esplorazione (mentale) di come è fatta e si comporta la materia. Sono tre le proposte di Democrito, che ancora oggi sono tre misteri nella meccanica quantistica: l’operazione di suddivisione della materia in parti più piccole non può procedere all’infinito, si raggiunge a un certo punto la particella più piccola, l’elementare, indivisibile “atomo”; gli atomi si muovono in uno “spazio-involucro” infinito e vuoto, cioè privo di atomi; “colui che ‘l mondo a caso pone’ ci dice che gli oggetti tutti, noi compresi, derivano dall’incontro e interazione casuale degli atomi che vagano in questo immenso spazio vuoto. Elementare, vuoto, casualità: eredità di Democrito quanto mai attuale negli odierni dibattiti in fisica tra particella e onda, vuoto classico e vuoto quantistico, simmetria e caso, unicità e molteplicità degli universi.

a.

Il paradosso di Achille e della tartaruga, enunciato da Zenone. Nell’esempio si assume per semplicità che la velocità di Achille sia il doppio di quella della tartaruga. Se inizialmente Achille si trova a $x=0$ e la tartaruga a $x=1/2$, nel tempo t_1 che Achille impiega per raggiungere la posizione $x=1/2$ la tartaruga si è spostata di $1/4$, portandosi nella posizione $x=3/4$. Ripetendo il calcolo una seconda volta, quando Achille si troverà nella posizione $x=3/4$ la tartaruga sarà arrivata nella posizione $x=7/8$. Anche ripetendo il calcolo un numero molto grande di volte (al limite un numero infinito di volte) la tartaruga sarà sempre davanti ad Achille. Il paradosso nasce dal fatto che in questa procedura l’intervallo di tempo si riduce ogni volta di un fattore due, per cui anche dopo infinite iterazioni il tempo totale trascorso non raggiunge mai $2 t_1$, che è il tempo (finito) necessario sia ad Achille che alla tartaruga per giungere alla posizione $x=1$, dove finalmente la tartaruga viene raggiunta.





b.
La statua di Gottfried Wilhelm Leibniz creata da Ernst Hänel (1883) e che si trova a Lipsia, in Germania.

Lo spazio in cui siamo immersi e il tempo che scorre sono infiniti? Newton ci dice di sì: tutti gli oggetti, le loro interazioni, in breve, quelli che in fisica chiamiamo gli “eventi”, hanno luogo in un immenso, anzi infinito teatro, un “universo-involucro” in cui le tre dimensioni spaziali sono fisse e immutabili e il tempo scorre in modo continuo da un ipotetico $t = 0$, inizio dell’universo, all’infinito. Mentre il tempo t scorre con continuità, la scena è costituita dalle stelle: Newton vuole trovare la dinamica, le leggi universali che regolano e determinano l’evoluzione lungo il tempo del sistema fisico considerato. Ma il mondo greco non cattura l’istante presente di questa dinamica, Achille non raggiunge mai la tartaruga. La velocità in un intervallo spaziale Δx percorso nell’intervallo di tempo Δt è data da $\Delta x / \Delta t$. Se voglio determinare la velocità istantanea, devo immaginare che l’intervallo temporale Δt diventi sempre più piccolo, fino ad annullarsi, e quindi che anche l’intervallo spaziale Δx si annulli. Per uscire dall’indeterminazione di 0 diviso 0 (eccoci di nuovo alle operazioni impossibili del maestro!) Newton, in contemporanea con Leibniz, trova una soluzione introducendo un intero nuovo modo di calcolare, il “calcolo infinitesimale”. Finalmente, gli intervalli Δt possono “tendere” a zero senza finire nell’incubo delle operazioni impossibili. Ora Achille può raggiungere la tartaruga, la freccia arriva al suo bersaglio, un infinito è domato.

Cent’anni fa, poi, arriva la relatività generale di Einstein che capovolge la visione di spazio e tempo newtoniana: ci dice che lo

spaziotempo non è il grande teatro fisso entro cui scorrono gli eventi dell’universo, ma esso stesso è originato e plasmato dal contenuto di materia ed energia. La geometria dell’universo non è più un dato di fatto fissato una volta per tutte dall’inizio dell’universo, ma dipende dal suo contenuto in termini di energia e materia. Sia studiando in dettaglio la radiazione cosmica di fondo, il “selfie” che si è fatto l’universo circa 400 mila anni dopo il Big Bang (vd. in Asimmetrie n. 15 p. 35 fig. c, ndr), sia sommando il valore di tutta la materia (ordinaria e oscura) e dell’energia oscura dell’universo, concludiamo che la geometria dell’universo è piatta. Tenuto conto che ogni punto nell’universo è equivalente a un altro e quindi ogni punto è centro dell’espansione dell’universo, ne deriva che l’universo è infinito! Ma come ha fatto l’universo che era piccolissimo all’epoca del Big Bang a diventare poi infinito? È solo un apparente paradosso: l’universo è stato sempre infinito. Pensate a un elastico infinito, in cui tracciate un segno ogni centimetro. Tirate, expandete ora l’elastico: i punti si allontaneranno l’uno dall’altro, magari passando a miliardi di anni luce uno dall’altro. Ma l’elastico era e rimane infinito, semplicemente due punti che erano vicini ora sono più lontani a causa dell’“espansione” dell’elastico. Le equazioni della relatività generale ci descrivono l’evoluzione dell’universo allo scorrere del tempo t . Grande è allora la tentazione di sapere cosa è successo in quel fatidico $t = 0$ in cui tutto è cominciato. Ma $t = 0$ ci conduce a valori infiniti di temperatura ed energia. E ancora un infinito o, come si dice

tecnicamente, una “singolarità”, sta alla base della nascita di un oggetto affascinante che forse racchiude in sé la risposta alle più profonde domande sul passato, presente e futuro dell’universo: la soluzione di buco nero (vd. in *Asimmetrie* n. 15 p. 35, ndr). La comparsa di infiniti o singolarità in tali regimi mostra l’inadeguatezza a descriverli delle equazioni della relatività generale e quindi la necessità di una nuova teoria (ancora da costruire), in cui relatività generale e meccanica quantistica si possano riconciliare. Accade spesso che la comparsa di infiniti può accompagnarsi a una fisica nuova oltre la teoria esistente. Agli inizi del 1900, l’austero professore tedesco Max Planck avanza la proposta forse più rivoluzionaria di tutta la storia della fisica. Egli suggerisce che gli scambi di energia nei fenomeni di emissione o assorbimento di radiazione non avvengano in forma continua, come ci insegna Maxwell, bensì attraverso lo scambio di “pacchetti” o quanti di energia. Questa ipotesi, oltre a fornire la corretta legge di distribuzione del “corpo nero”, evita un problema di “infinito” noto come “catastrofe ultravioletta” (vd. p. 38 e 40, ndr). Il meraviglioso dialogo tra discreto e continuo, poi, prosegue: dalla suddivisione di “pacchetti” di spazio, che dividono il piè veloce di Achille

dalla tartaruga, al continuo della dinamica, basata sul calcolo infinitesimale di Newton, e, viceversa, dall’energia che con continuità viene trasferita da tutte le frequenze dell’onda elettromagnetica di Maxwell allo scambio di quanti di energia ipotizzato da Planck, fino ad arrivare a vere e proprie particelle che trasportano in forma quantizzata l’energia elettromagnetica, i fotoni, introdotti da Einstein per spiegare l’effetto fotoelettrico. Come il campo elettromagnetico quantizzato viene associato a una particella elementare, ovvero al fotone, così le particelle elementari (gli atomi di Democrito dei giorni nostri) vengono descritte da campi quantizzati. Ma ecco che già nell’elettrodinamica quantistica (Qed), la teoria dei campi più semplice in cui due soli campi quantistici, quello del fotone e quello dell’elettrone, interagiscono tra loro, riappare l’incubo dell’infinito, legato a una rilettura del tutto nuova del vuoto di Democrito. Nella Qed, infatti, il vuoto quantistico è attivo, sede di incessanti processi in cui particelle (virtuali) originano dal vuoto stesso per poi ritornarvi, scomparendo in brevissimo tempo. E quando vogliamo includere tutti i possibili valori di energia, prima presa a prestito per creare le particelle virtuali dal vuoto e poi resa al vuoto nell’annichilazione di tali particelle,

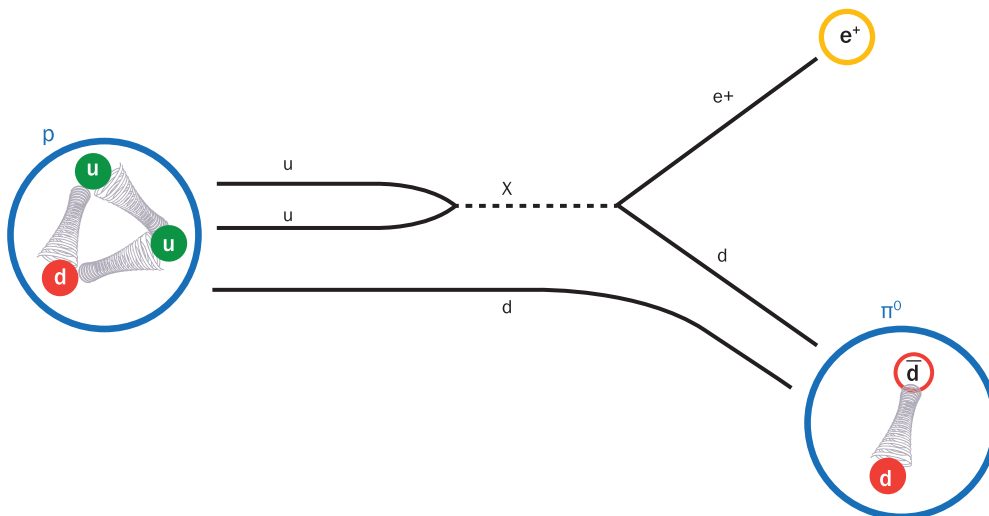
c.
Una delle foto della serie “Baffi di Dali” del fotografo Philippe Halsman (1954). Il simbolo dell’infinito (∞), utilizzato per la prima volta in epoca moderna da John Wallis nel 1655, è entrato nell’immaginario comune.



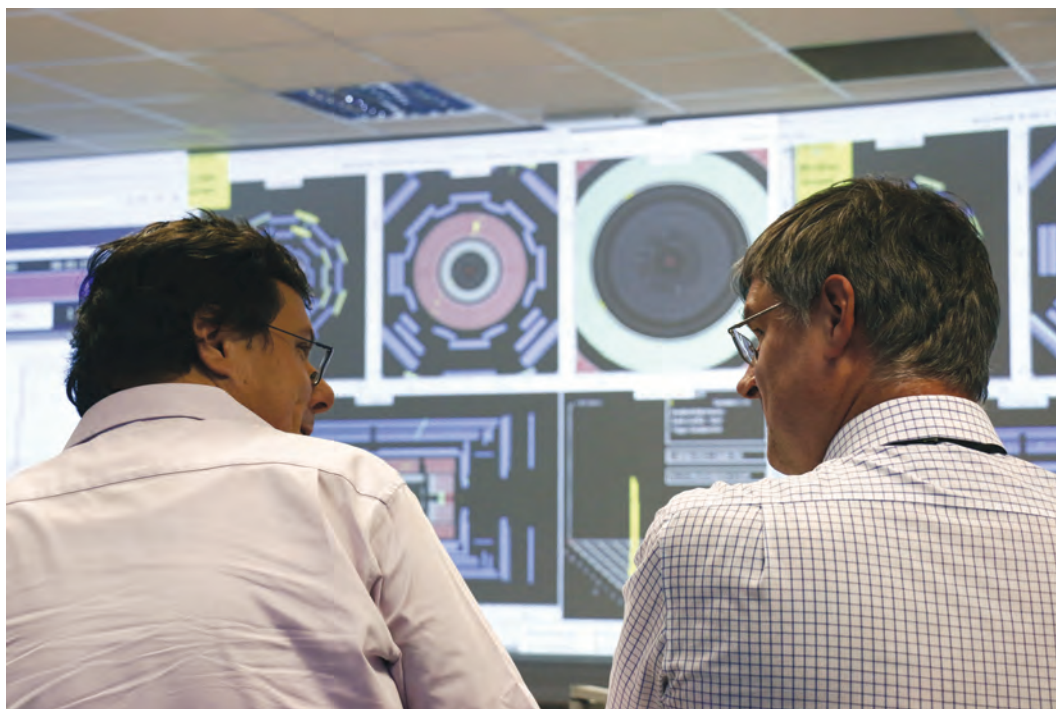
ritroviamo che questa somma di infiniti termini può esplodere in un (non-)risultato infinito. Il problema ha la sua origine nella natura stessa del campo quantizzato il cui valore dipende dal punto dello spazio e dall'istante di tempo in cui lo si calcola. Questo punto spaziotemporale ci rimanda all'astratto concetto di "punto" di Euclide, che non ha una dimensione finita. La comparsa di infiniti segnala che dobbiamo fare un salto in avanti, passando da campi funzione di punti spaziotemporali a oggetti che hanno una dimensione, ad esempio delle corde unidimensionali (le stringhe, vd. in Asimmetrie 18 p. 42, ndr) o addirittura superfici a più dimensioni (le brane, vd. in Asimmetrie n. 18 p. 44, ndr), in modo da impedire alla radice la comparsa degli infiniti nelle teorie di campo? Oppure, visto l'innegabile successo predittivo di teorie come la Qed o la più elaborata teoria dei campi che è il modello standard delle interazioni fondamentali, dobbiamo salvare in sé la teoria dei campi quantizzati, avvalendoci solo di una speciale classe di teorie dei campi in cui sia possibile rimuovere gli infiniti? Le teorie di campo in cui è possibile spazzare sotto il tappeto (rappresentato dai parametri liberi della teoria) tutti gli infiniti che compaiono sono chiamate "teorie rinormalizzabili" (vd. p. 10, ndr). La gravitazione di Newton, rivisitata da Einstein nella relatività generale, non è riconducibile a una teoria del campo gravitazionale quantizzata proprio perché essa non è rinormalizzabile. Anche quest'altro infinito ci spinge con urgenza a cercare una teoria quantizzata della gravità, in cui relatività generale e meccanica quantistica coesistano consistentemente (vd. p. 13, ndr). La mancanza di una teoria di campo quantistica della gravità viene resa ancor più acuta in un quadro di descrizione unificata di tutte le forze fondamentali in natura. A una scala di energia altissima, circa 14 ordini di grandezza al di sopra del valore della massa del bosone di Higgs – tipico della scala di energia del modello standard – le tre forze del modello standard, la debole, l'elettromagnetica e

la forte, tendono ad avere lo stesso valore (vd. in Asimmetrie n. 18 p. 8, ndr). La teoria di grande unificazione (Gut), in cui questo avviene, presenta nuove forze, oltre alle tre del modello standard. Esse, in generale, possono far decadere il mattone fondamentale della materia, nel senso che un protone potrebbe disintegrarsi in altre particelle più leggere, compromettendo quindi la stabilità della materia. La scala di energia altissima delle Gut comporta una lunghissima vita media del protone, addirittura miliardi e miliardi di volte maggiore dell'odierna età dell'universo, che è di circa 13-14 miliardi di anni: lunghissima, ma non infinita (vd. p. 27, ndr). Per ultimo, trattiamo il ruolo più importante dal punto di vista "fenomenologico" che l'infinito gioca in una teoria di campo, in cui siano presenti particelle di massa molto diversa che interagiscono tra loro. Le teorie Gut ne sono un esempio. A causa degli effetti virtuali a cui è già stato accennato, il bosone di Higgs può interagire con particelle (virtuali) che hanno masse dell'ordine della scala di energia della Gut. Ciò comporta che la massa del bosone di Higgs verrebbe a subire correzioni dell'ordine della scala Gut. In definitiva, a meno che tali correzioni non si cancellino tra loro in maniera accuratissima, non ci sarebbe modo di tenere la massa del bosone di Higgs alla scala del modello standard: essa andrebbe alla scala Gut e ciò darebbe luogo a un universo completamente diverso dal nostro (in particolare, noi non esisteremmo).

Ed eccoci al dilemma: caso o necessità? Se vogliamo evitare la cancellazione casuale delle correzioni alla massa del bosone di Higgs, dobbiamo chiedere che a una scala vicina a quella del modello standard compaia una nuova fisica (nuove particelle o nuove interazioni) che impedisca la comparsa di correzioni proporzionali alla scala Gut. Questa nuova fisica può essere legata a un nuovo tipo di simmetria esistente in natura, la supersimmetria (vd. in Asimmetrie n. 18 p. 13, ndr). Oppure,



d. Il modello di Georgi-Glashow (uno dei modelli della Gut) prevede l'esistenza di una nuova forza mediata da due particelle, i bosoni X e Y, che accoppiano quark e leptoni. Il bosone X può essere prodotto, per esempio, dalla fusione di due quark up e decadere in un positrone e un antiquark down. Diventa quindi possibile la reazione rappresentata in figura, nella quale i due quark up del protone producono un X che poi decade in positrone e antiquark down. Quest'ultimo si ricombina col rimanente quark down del protone per formare un pione neutro. Questa reazione realizza quindi il decadimento del protone in un positrone e un pione neutro (vd. p. 27, ndr).



e.
Fisici in una sala di controllo di Lhc (sugli schermi sono visibili degli “eventi”), alla ricerca di una nuova fisica.

potrebbe essere legata alla presenza di nuove dimensioni spaziotemporali (come per esempio nella teoria delle stringhe). O ancora, il bosone di Higgs potrebbe essere una particella non elementare, la cui massa è legata a una scala di energia da cui emergerebbe il suo carattere composito. Quello che è cruciale dal punto di vista sperimentale è che in tutte queste situazioni, in cui esiste una ragione “dinamica” che tiene il bosone di Higgs alla massa a cui lo abbiamo osservato, dovremmo essere in grado di scoprire nuova fisica a una scala di energia accessibile a Lhc o comunque a future macchine acceleratrici a cui si sta già pensando (vd. in *Asimmetrie* n. 18 p. 19, ndr). Esiste un’alternativa alla “necessità” di nuova fisica vicina alla scala del modello standard. È la via della casualità. Ad esempio, nelle teorie delle stringhe vi è la possibilità che si realizzino molteplici universi in ciascuno dei quali il bosone di Higgs possiede una massa di valore diverso (i cosiddetti “multiversi”, vd.

p. 21, ndr). Se il numero di universi è grandissimo, vi è una certa probabilità che esista un universo in cui il bosone di Higgs ha una massa corrispondente a quella misurata da noi e in cui, pertanto, si realizzano le condizioni necessarie per la nostra esistenza. Per qualcuno, questa spiegazione antropica è una di quelle a cui ricorrere, semmai le soluzioni che fanno capo alla via della “necessità” venissero a cadere.

Da problema da evitare, risolvere, aggirare, l’infinito potrebbe risultare il cruciale portale attraverso cui passare per approdare a una nuova teoria fisica che includa relatività generale e meccanica quantistica. In essa la gravità potrà essere quantizzata e unificata con le altre interazioni fondamentali e, forse, una nuova simmetria o un nuovo spaziotempo stabilizzeranno il valore della massa del bosone di Higgs al valore osservato, cruciale sia per la nostra esistenza che per quella del nostro universo.

Biografia

Antonio Masiero è professore dell’Università di Padova e vicepresidente dell’Infn dal 2011. Precedentemente è stato direttore della sezione di Padova dell’Infn. La sua attività verte sulla ricerca di nuova fisica al di là del modello standard con particolare attenzione alle connessioni tra fisica delle particelle e cosmologia.

L'infinito sotto il tappeto

Come normalizzare le teorie divergenti

di Massimo Passera



a.
Un gruppo di fisici attorno a Feynman (al centro davanti al tavolino), tra cui Schwinger (tutto a destra nella foto), intenti in una discussione durante una conferenza scientifica nel giugno del 1947.

Immaginate una teoria che, in prima approssimazione, dia risultati corretti nel descrivere la realtà. È un buon inizio, ma appena tentate di raffinare il calcolo, per renderlo più preciso, trovate che la correzione che vi aspettavate piccola, in realtà, è infinita! Cosa fareste? Questa è la situazione in cui si trovarono Freeman Dyson, Richard Feynman, Julian Schwinger e Sin-Itiro Tomonaga con l'elettrodinamica quantistica (Qed), “la strana teoria della luce e degli elettroni”, verso la fine degli anni ‘40.

Il problema degli “infiniti” era già noto da tempo in fisica classica. Basti pensare all’energia del campo elettrico di una sferetta carica, il cui raggio r tenda a zero: l’energia tende all’infinito (ovvero “diverge”, come si dice in termini

scientifici) come $1/r$. Per la teoria della relatività speciale di Einstein, parte della massa della sferetta deriva dall’energia (divergente!) contenuta nel campo elettrico che la circonda. Si potrebbe pensare che nessuna carica elettrica è in realtà puntiforme e che il problema è semplicemente dovuto a un’astrazione matematica. Ma come formulare quindi una teoria che descriva oggetti elementari, cioè puntiformi? Il problema perdura nelle teorie di campo quantistiche come la Qed.

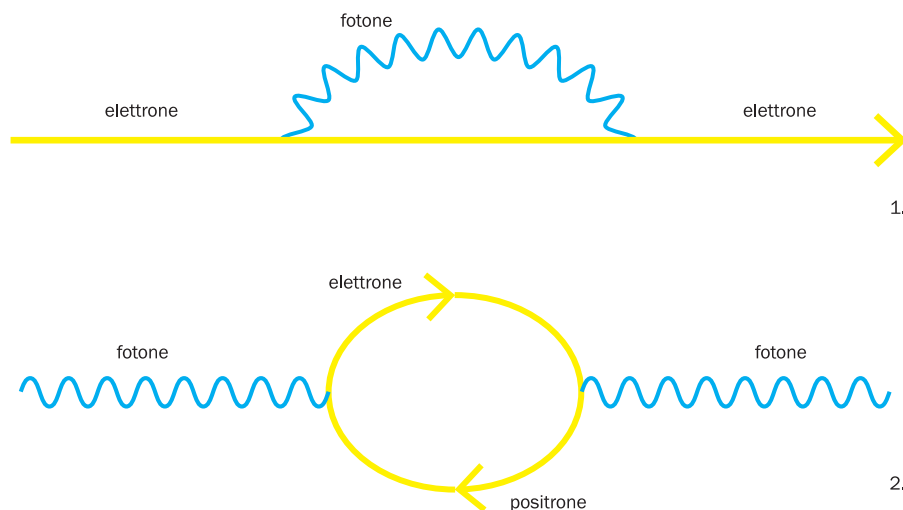
Alle piccolissime scale (vd. in Asimmetrie n. 18 p. 10, ndr) in cui la fisica classica cede il passo a quella quantistica, il principio di indeterminazione di Heisenberg consente, per intervalli di tempo molto piccoli, la presenza di

particelle “virtuali” (vd. anche in Asimmetrie n. 19 p. 19, ndr). Si tratta di particelle con caratteristiche identiche a quelle reali, ma con valori di energia anomali. Un elettrone a riposo, per esempio, ha un’energia pari alla sua massa m moltiplicata per il quadrato della velocità della luce c (è la famosa equazione di Einstein $E = mc^2$). Se l’elettrone è invece in movimento, la sua energia è maggiore di mc^2 , ed è data da una ben precisa funzione di m , c e della quantità di moto p (è l’equazione della relatività speciale $E^2 = p^2c^2 + m^2c^4$, vd. in Asimmetrie n. 19 p. 16, ndr): tanto più veloce è l’elettrone, tanto maggiore è la sua energia. Nessun elettrone può avere quindi energia nulla né, tantomeno, può avere energia negativa! Questo non è più

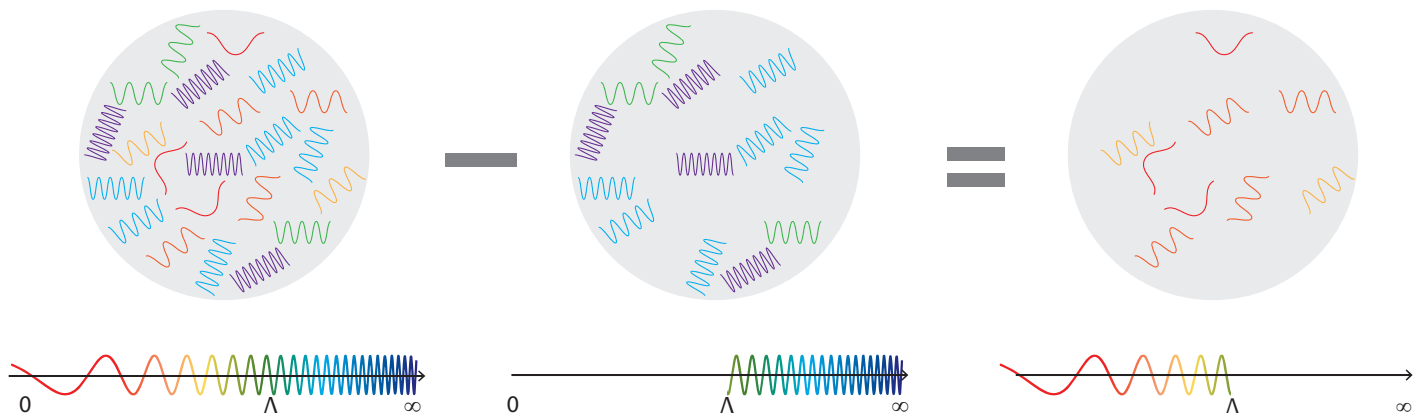
vero per un elettrone virtuale, che può avere invece qualsiasi valore di energia. Ma tanto più anomala è quest'energia (ovvero, tanto più virtuale è l'elettrone), tanto più breve sarà la sua vita. Il concetto di particella virtuale ci permette di comprendere l'origine degli infiniti in teorie di campo quantistiche. Partiamo, come primo esempio, dal fatto che un elettrone libero non può emettere un fotone. Consideriamo infatti un elettrone libero a riposo. Avendo velocità nulla, esso giace nel suo stato di minima energia mc^2 . Se emettesse un fotone, di qualsiasi energia, per la legge di conservazione dell'energia l'elettrone si ritroverebbe ad avere un'energia inferiore al suo valore minimo. Dunque non può emetterlo! Lo stesso vale anche per un elettrone libero in moto, dato che può essere immaginato come un elettrone a riposo visto da un osservatore in moto. Un elettrone libero può tuttavia emettere un fotone virtuale, divenendo esso stesso virtuale, purché lo riassorba rapidamente ritornando così a essere un elettrone reale. Questo processo può essere rappresentato in modo intuitivo tramite i diagrammi di Feynman (vd. fig. b1). Nella fase di transizione, l'elettrone e il fotone virtuali hanno una gamma infinita di energie possibili. Per esempio, il fotone virtuale può essere molto energetico, mentre l'elettrone virtuale può avere energia negativa. L'unico vincolo è che la somma delle loro energie sia pari a quella dell'elettrone iniziale (e finale). Consideriamo un secondo esempio: un fotone, che ha massa a riposo nulla, non può trasformarsi nel vuoto in una coppia costituita da un elettrone e un "positrone" (l'antiparticella dell'elettrone, cioè dotata della stessa massa m dell'elettrone, ma di carica opposta). Questo vale anche se il fotone ha un'energia maggiore di $2mc^2$, maggiore cioè della somma delle

energie dell'elettrone e del positrone liberi a riposo. Infatti, per quanto il fotone (che avendo massa nulla non può mai "stare fermo") sia energetico, se lo osservate in un sistema di riferimento in moto lungo la sua stessa direzione con una velocità sufficiente, esso avrà un'energia inferiore a $2mc^2$, che è il valore minimo necessario a produrre un elettrone e un positrone. Anche in questo secondo esempio, il fotone può però trasformarsi in un elettrone e un positrone virtuali, le cui energie possono variare in una gamma infinita di valori (vd. fig. b2). Dopo un tempo brevissimo, la coppia virtuale svanisce in un lampo di luce, lasciando però una traccia indelebile della sua breve esistenza.

La trattazione dei processi di Qed sopra descritti richiede quindi una specie di somma di tutte le possibili (infinite) configurazioni di energia che possono assumere le particelle virtuali. Il problema è che questa somma talvolta diverge, assume cioè un valore infinito. Ciascuna di queste configurazioni ha un peso, che dipende da quanto l'energia di ciascuna particella virtuale si discosta da quella che avrebbe se fosse reale. Se le configurazioni con particelle virtuali molto energetiche hanno un peso troppo grande, la somma totale è infinita. Queste divergenze, presenti in entrambi gli esempi sopra discussi, sono dette "ultraviolette", come i fotoni di alta energia. Altre divergenze, determinate invece dai contributi virtuali a bassa energia, vengono chiamate "infrarosse". Queste ultime compaiono in teorie con particelle prive di massa (come il fotone) e hanno un'origine fisica; ci indicano che stiamo studiando la quantità sbagliata e scompaiono quando calcoliamo processi fisici che possono essere effettivamente misurati sperimentalmente.



b.
Due diagrammi di Feynman (vd in Asimmetrie n. 19 p. 11, ndr), che descrivono un elettrone libero (1) e un fotone libero (2). Un elettrone libero non può emettere un fotone, o meglio lo può fare solo se "riassorbe" il fotone emesso dopo un tempo "brevissimo". In questo tempo brevissimo sia l'elettrone che il fotone sono detti "virtuali" e possono assumere valori qualsiasi di energia, purché la somma delle due energie sia pari a quella dell'elettrone prima e dopo l'emissione/assorbimento del fotone. Allo stesso modo, un fotone libero non può trasformarsi in una coppia elettrone-positrone, se non per un tempo brevissimo. Come nel caso 1) l'elettrone e il positrone sono particelle virtuali con energia qualsiasi e con l'unico vincolo che la somma delle loro energie sia uguale a quella del fotone prima e dopo la produzione/annichilazione della coppia.



Le divergenze ultraviolette della Qed possono essere eliminate mediante la cosiddetta “rinormalizzazione”. È questa la soluzione che trovarono Dyson, Feynman, Schwinger e Tomonaga. Questa procedura consiste nell’assorbire, cioè “spostare”, le divergenze (gli infiniti) contenuti nelle predizioni teoriche, nei parametri liberi della teoria. Questi ultimi diventano essi stessi infiniti e non hanno più alcun significato fisico, ma mantengono una relazione con quantità direttamente misurabili. Quando il risultato del calcolo di un processo fisico viene espresso in termini di quantità misurabili, anziché mediante i parametri liberi del modello teorico (che, come detto sopra, non hanno più alcun significato fisico), le divergenze si cancellano esattamente. Affinché la teoria sia rinormalizzabile, è però necessario che tutti gli infiniti che compaiono nei calcoli possano essere assorbiti in un numero finito di parametri liberi. Questo è proprio ciò che avviene nella Qed, dove è sufficiente esprimere il calcolo di un qualsiasi processo fisico in termini della massa e della carica elettrica dell’elettrone, misurate sperimentalmente, per ottenere un risultato finito. Per quanto bizzarra (o “svitata”, come la definì lo stesso Feynman) possa sembrare, questa procedura, dettata da regole ben precise, funziona perfettamente. Grazie a questa fantastica cancellazione degli infiniti alla fine degli anni ‘40, la Qed acquistò il suo completo potere predittivo e da quasi 70 anni fornisce predizioni in splendido accordo con gli esperimenti. Nel 1971, Gerardus ‘t Hooft e Martinus Veltman riuscirono a dimostrare che

anche le interazioni deboli sono rinormalizzabili, aprendo così la strada del successo alla meravigliosa sintesi del modello standard, l’elegante ed economica teoria delle interazioni elettromagnetiche, forti e deboli. Non tutte le teorie quantistiche dei campi sono però rinormalizzabili. In molti casi, infatti, gli infiniti non possono essere assorbiti in un numero limitato di parametri liberi e la teoria, detta “non rinormalizzabile”, contiene divergenze ultraviolette. Nonostante questo, le teorie non rinormalizzabili hanno un ruolo fondamentale nella nostra descrizione della natura. In particolare, la teoria quantistica della gravità non è rinormalizzabile (vd. p. 13, ndr). Mentre in passato la rinormalizzabilità di una teoria veniva considerata un principio fondamentale, oggi pensiamo che ogni teoria di campo quantistica realistica delle interazioni fondamentali contenga parti rinormalizzabili, come nel modello standard, e altre che non lo sono e che sono divergenti ad alta energia. Per ora, gli infiniti che non riusciamo a spazzare sotto il tappeto parametrizzano la nostra ignoranza della fisica a queste alte energie. Non ci resta che continuare la nostra ricerca verso energie sempre più grandi.

c. Rappresentazione schematica del concetto di rinormalizzazione. La prima sfera rappresenta la somma di tutte le energie che possono assumere le particelle virtuali in un determinato processo. Anche se questa somma è infinita, può essere rinormalizzata sottraendogli la somma di tutte le energie superiori a un certo valore, indicato con λ in figura (seconda sfera). Quello che resta, la terza sfera in figura, è una quantità ben definita. La terza sfera descrive quantità misurabili che accadono nei processi fisici a energie inferiori di λ , mentre la prima e la seconda, che hanno valore infinito, descrivono quantità o parametri non misurabili.

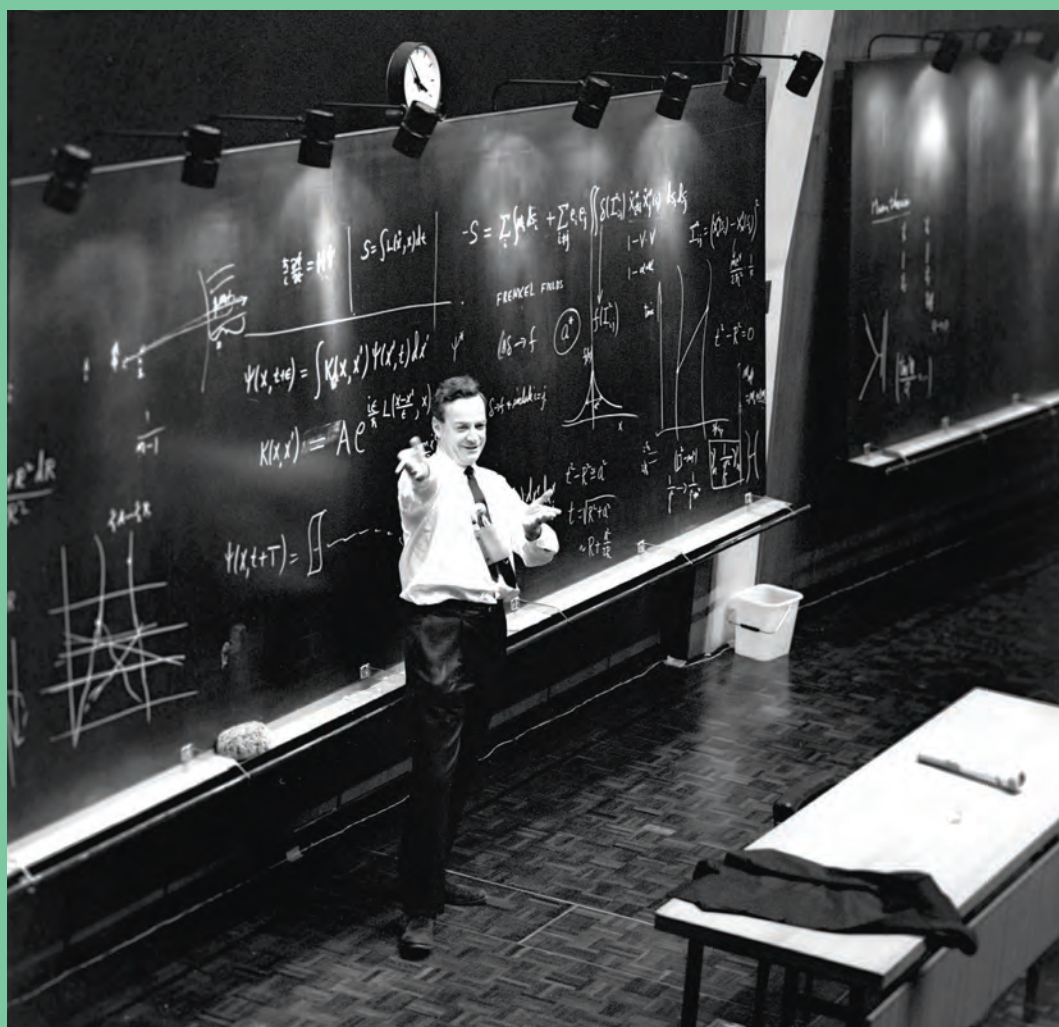
Biografia

Massimo Passera è ricercatore dell’Infn della sezione di Padova. Fisico teorico delle particelle elementari, si occupa principalmente di test di precisione del modello standard.

La gravità gravita

Come coniugare la relatività generale e la meccanica quantistica

di Luca Griguolo



a.
Richard Feynman al Cern,
nel 1970.

Nel 1962 Richard Feynman partecipò alla conferenza di Varsavia sulla teoria della gravitazione e quello che presentò diede virtualmente inizio a una delle maggiori sfide (o uno dei peggiori incubi) della fisica teorica contemporanea: la gravità quantistica. Nel suo approccio pragmatico, capire il comportamento a piccole distanze della forza di gravità significava studiare i processi d'urto della particella associata al campo gravitazionale, l'elusivo quanto di spin 2 detto

“gravitone”, in perfetta analogia con lo studio dei fotoni in elettrodinamica. Una strada assolutamente innovativa all'epoca, nella quale gli eleganti aspetti geometrici della relatività generale non venivano assunti ma emergevano, eventualmente, come risultato delle interazioni. Feynman capì che il problema chiave della descrizione quantistica della gravità era che “la gravità gravita”: la gravitazione è una forza universalmente attrattiva che si accoppia alla massa-energia e,

poiché il campo gravitazionale stesso possiede energia, la teoria quantistica genera un numero infinito di interazioni. Mentre questi effetti possono essere trascurabili in esperimenti di laboratorio o sulla scala del sistema solare, in situazioni dove invece il campo gravitazionale è particolarmente forte (vicino a un buco nero o all'origine dell'universo) diventano dominanti e tendono a esplodere portando a risultati insensati.

La comparsa di infiniti quantistici nella teoria di Einstein non è comunque una sorpresa: nelle teorie di campo quantistiche è anzi la regola ed è legata alle infinite configurazioni di energia che possono assumere le particelle virtuali (vd. p. 10, ndr). La presenza di questi contributi è controllata, normalmente, attraverso la procedura di rinormalizzazione: questa permette di inglobare le cosiddette divergenze ultraviolette nella definizione di un numero finito di parametri misurabili, dai quali dipende la teoria stessa. In elettrodinamica, ad esempio, una volta assunto il valore della massa dell'elettrone e della carica elettrica, è

possibile procedere con i calcoli quantistici ottenendo risultati finiti. La gravità invece sfugge a questo schema, essendo una teoria non rinormalizzabile: in altre parole, come aveva intuito Feynman, l'auto-interazione fra i gravitoni genera quantisticamente un numero infinito di nuovi termini di interazione, a ognuno dei quali corrisponde un nuovo coefficiente della teoria. La conseguenza è che per fare una previsione precisa sull'urto di un gravitone con un elettrone, ad esempio, occorrerebbero infiniti esperimenti preliminari per fissare tutti i nuovi coefficienti! La teoria perderebbe così la sua predittività, cioè la capacità di fornire previsioni su tutti i possibili risultati sperimentali, una volta che siano stati calibrati un numero finito di coefficienti.

Ma come è possibile allora che questi effetti catastrofici, che derivano dal voler mettere insieme la relatività generale e la meccanica quantistica, non si manifestino in condizioni normali, in cui queste teorie sono invece soddisfacenti e predittive? Il punto è che esiste una scala di lunghezza fondamentale, la

scala di Planck, costruita a partire da tre costanti fondamentali della natura, e cioè la costante di gravitazione universale G , la velocità della luce c e la costante di Planck h (vd. in Asimmetrie n. 15 p. 38, ndr). La stessa teoria della rinormalizzazione ci assicura che per ogni processo su scale più grandi della lunghezza di Planck (che corrisponde a $1,6 \times 10^{-33}$ cm), si possano fare calcoli predittivi affidandosi a un numero finito di misure. È soltanto quando ci avviciniamo alle piccolissime lunghezze dell'ordine della scala di Planck che le nuove interazioni diventano man mano più rilevanti e, quindi, la teoria non è più predittiva. In questo senso la gravità di Einstein può essere vista come una teoria "effettiva" (vd. in Asimmetrie n. 18 p. 10, ndr), che descrive efficacemente le fluttuazioni quantistiche di curvatura sopra uno spazio classico fintanto che queste rimangono piccole.

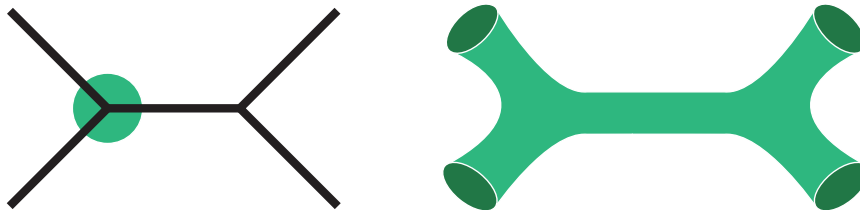
Come già detto, i fisici vorrebbero però controllare una teoria quantistica anche in situazioni in cui il campo gravitazionale è forte: negli anni sono state formulate varie proposte e due, in particolare, risultano attraenti per sfuggire al

b.

Il fisico Steven Weinberg, premio Nobel per la formulazione della teoria elettrodebole nel 1979 assieme a Sheldon Glashow e Abdus Salam, ha ipotizzato che il comportamento della gravità ad altissime energie sia quello di una teoria rinormalizzabile.



c.
Rappresentazione schematica di un processo d'urto tra due particelle. Secondo la teoria delle stringhe, se visto a piccole distanze, l'urto non coinvolge particelle puntiformi (a sinistra) ma stringhe (a destra), ossia oggetti che hanno una estensione spaziale non nulla. Questo modifica radicalmente il comportamento ultravioletto (cioè a piccole distanze) della teoria, eliminando gli infiniti che si generano quando le particelle puntiformi si avvicinano indefinitamente, come all'interno del cerchio verde della figura di sinistra.



problema della non rinormalizzabilità. La prima, che potremmo definire “conservatrice”, invoca il fenomeno della “salvezza asintotica”, ipotizzato da Steven Weinberg: in questo scenario gli infiniti coefficienti della teoria non sarebbero fra loro indipendenti, ma controllati da un numero finito di parametri che caratterizzerebbero la gravità ad altissime energie. Recenti evidenze teoriche per questa proposta sono state ottenute attraverso una tecnica nota come “gruppo di rinormalizzazione esatto”. Una seconda via di uscita, che potremmo chiamare invece “progressista”, consiste nel supporre che, alle energie in cui la teoria di Einstein diventa incontrollabile, altri gradi di libertà (altre particelle, ad oggi non rivelate) entrino in gioco, modificando il comportamento delle fluttuazioni quantistiche. Abbastanza sorprendentemente, negli anni ‘70, ci si accorse che la teoria delle stringhe, inizialmente proposta per descrivere le interazioni nucleari forti, generalizzava in maniera naturale la teoria di Einstein, producendo la comparsa proprio di questi nuovi gradi di libertà ad alte energie. La teoria delle stringhe sostituisce al concetto di particella quello di stringa, un ente unidimensionale ai cui modi di vibrazione si associano diverse particelle.

Ogni “nota” di questa corda vibrante corrisponde a un particolare stato di massa e spin. Joel Scherk e John Schwarz notarono che il gravitone poteva essere visto come un’eccitazione di massa nulla e spin 2 della stringa fondamentale, e i pericolosi infiniti associati al suo comportamento quantistico venivano regolati dalle interazioni con le altre (infinite) particelle massive dovute alle vibrazioni. La geometria stessa dello spaziotempo (il sale della relatività generale), in cui la stringa si muove, appare come un effetto di bassa energia ed è regolato, in prima approssimazione, proprio dalle equazioni di Einstein! In questa estensione della gravità si possono calcolare inoltre i processi di urto in maniera sistematica a tutte le energie (vd. fig. c, ndr). Unico problema, non da poco, che le stringhe necessitano di uno spaziotempo a dieci dimensioni (sei più di quelle ordinarie) e non ci sono ancora evidenze osservabili di tale teoria. In realtà, risolvere il problema delle divergenze ultraviolette non è ancora la fine della storia: sulla strada per la gravità quantistica esistono ostacoli ancora più fondamentali. Uno di questi è la comprensione del “paradosso dell’informazione”, direttamente collegato

alla scoperta di Stephen Hawking che i buchi neri evaporano a livello quantistico (vd. in *Asimmetrie* n. 19 p. 38, ndr). Questo fenomeno implica la perdita di “unitarietà” nella teoria quantistica: in parole semplici la probabilità totale dei processi non si conserverebbe e le proprietà distintive portate dalle particelle elementari verrebbero perdute. Ad esempio, in un processo d’urto, ci sarebbe la possibilità che niente avvenga e che le particelle semplicemente “scompaiano” nel nulla (cosa non molto soddisfacente per un fisico). Questo tipo di problema è indipendente dal tipo di gravità quantistica considerato ed emerge ogni volta che un processo è in grado di generare un buco nero: un problema quindi anche a grandi distanze, come hanno fatto vedere Daniele Amati, Marcello Ciafaloni e Gabriele Veneziano in una serie di lavori degli anni ‘90. Il cammino verso la gravità quantistica è quindi ancora lungo e altre proposte, oltre alle stringhe, sono state fatte per superare questi ostacoli: olografia, gravità quantistica a loop (vd. in *Asimmetrie* n. 17 p. 7, ndr), geometria non commutativa, solo per citarne alcune, ma nessuna ha dato risposte conclusive. La natura sembra veramente gelosa di uno dei suoi segreti più profondi.

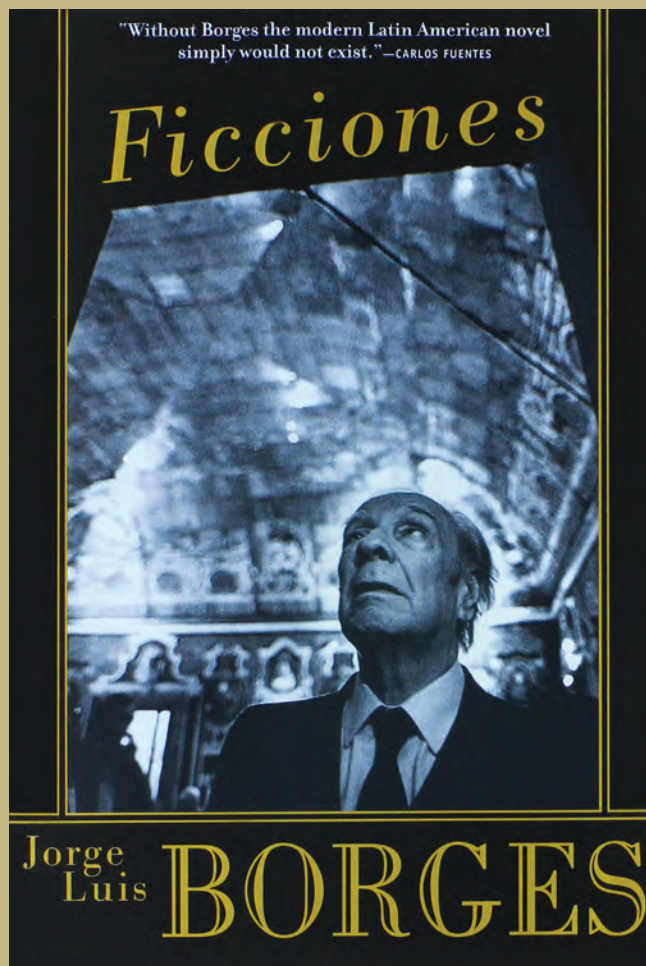
Biografia

Luca Griguolo ha conseguito il PhD in teoria delle particelle elementari alla Sissa di Trieste ed è stato post-doc al Massachusetts Institute of Technology (Mit). Ricercatore universitario al Dipartimento di Fisica dell’Università di Parma, è attualmente professore associato di fisica teorica nello stesso dipartimento. Si occupa principalmente di aspetti non-perturbativi in teoria quantistica dei campi e di problematiche legate alla teoria delle stringhe. È uno degli organizzatori e docenti della Scuola di Dottorato Laces, che si svolge dal 2008 al Galileo Galilei Institute for Theoretical Physics di Firenze.

Infinito, che passione

Uno scenario “fantascientifico”

di Tullio Regge



Pubblichiamo il testo di un breve *divertissement*, dal titolo originale *A science fiction scenario*, che Tullio Regge presentò nel 1984 a un convegno in onore del fisico torinese Gian Carlo Wick, uno dei padri della teoria quantistica dei campi (l'intervento fu poi pubblicato nel 1986 nel volume *Old and New Problems in Fundamental Physics*, Scuola Normale Superiore, Pisa). Il testo, leggermente abbreviato, è riprodotto per gentile concessione delle Edizioni della Normale e della famiglia Regge.

a.

Nel racconto “La biblioteca di Babele”, tratto dalla sua opera *Finzioni* (*Ficciones* il titolo originale in spagnolo), Borges descrive una libreria fantastica che chiama “l'Universo”.

In un famoso racconto lo scrittore argentino Jorge Luis Borges descrive una biblioteca fantastica, che si estende su uno spazio vastissimo e contiene un incalcolabile numero di volumi, nonché una popolazione residente di lettori. Egli chiama questa libreria “l'Universo”. Ogni libro ha un numero fisso di pagine, ogni pagina un numero fisso di righe, ogni riga una “parola” costruita con un alfabeto di 26 lettere (presumo l'alfabeto spagnolo). Questi numeri non sono particolarmente rilevanti, ma Borges afferma che la biblioteca contiene tutti i possibili libri scritti in questo modo. Una volta ho calcolato il volume di una biblioteca siffatta, ottenendo qualcosa come 103.000 chilometri cubi. Nonostante questi problemi, penso che Borges

meriti un apprezzamento. Egli usa una metafora altamente poetica per descrivere la sua visione dell'universo. La sua biblioteca contiene tutti i libri, inclusi quelli che riportano la spiegazione corretta per l'esistenza della biblioteca stessa, e quelli che riportano le spiegazioni sbagliate.

Io sostengo una tesi simile riguardo al nostro universo: penso che esso contenga tutte le possibili configurazioni dei campi (compatibili con le leggi fisiche). Per fare ciò, l'universo deve avere un'estensione infinita, e siamo quindi portati a preferire i modelli aperti. Questo principio può essere enunciato nella seguente forma:

b.

Una delle prime immagini che vengono in mente quando pensiamo all'infinito: un cielo stellato.



1. Tutto ciò che è possibile esiste da qualche parte e in qualche tempo durante la vita dell'universo.

Forme più deboli di questo principio sono state usate in meccanica quantistica per mostrare che processi non proibiti in maniera esplicita dalle regole di selezione si verificano effettivamente. Io richiedo qualcosa di più forte. Se le leggi fisiche non impediscono l'esistenza di un oggetto improbabile, come potrebbe essere una statua di Sam Treiman (fisico statunitense, ndr) fatta di xenon solidificato, allora tale oggetto deve esistere in qualche luogo. La sua distanza da noi può essere enorme, ben al di là dell'orizzonte cosmologico, può essere stata costruita nel passato o magari apparirà in futuro; i dettagli sono irrilevanti.

In effetti, l'universo aperto ha avuto inizio con temperature e densità estremamente elevate ed evolverà verso l'estremo opposto del freddo e del vuoto.

Jacques Monod (biologo francese, autore de *Il caso e la necessità*, ndr) ha affermato che non bisogna mescolare le conoscenze con i valori; il nostro collega Freeman Dyson si diverte a fare esattamente l'opposto, e io sono ben consapevole di imitarlo.

Penso che sia uno spreco concepire delle leggi fisiche, delle equazioni di campo che selezionano particolari configurazioni di materia, senza che ciò comporti l'esistenza reale di tali configurazioni, non solo in un mondo platonico. Vorrei quindi

cogliere questa occasione per esprimere un mio pregiudizio. Mi piace l'infinito. Il principio 1 prescrive un universo infinito, ma il principio 2 va un po' oltre:

2. Le leggi fisiche contengono un gruppo di simmetria a infiniti parametri.

Con un gruppo di questo genere ci aspettiamo una sequenza infinita di rotture di simmetria (vd. in *Asimmetrie* n. 11 p. 4, ndr) e un insieme infinito di scale di energia alle quali delle simmetrie parziali sono ripristinate.

La ricerca di una teoria finale non avrà mai termine. Il principio 2 ha un'importante conseguenza. Andando indietro verso il Big Bang, osserviamo sempre più simmetrie. Il numero delle dimensioni dello spazio è legato a queste simmetrie.

Suggerisco quindi il principio 3:

3. Il numero delle dimensioni dello spaziotempo è infinito. La riduzione dimensionale rimuove queste dimensioni, eccezion fatta per un numero finito di esse. Man mano che ci avviciniamo al Big Bang, tutte le dimensioni diventano visibili.

Una tale infinità è tuttavia di scarso interesse se la sua struttura può essere svelata e descritta da pochi postulati. Abbiamo pertanto bisogno di un ulteriore principio, che posso formulare grosso modo come segue:



c.
Fisico teorico di fama mondiale, Tullio Regge coltivò vasti e profondi interessi anche in campo artistico e letterario.

4. Le teorie unificate di campo sono gödeliane. In altri termini la teoria finale non è computabile e non può essere costruita mediante una procedura decisionale finita. Non c'è modo di sapere che cosa succederà domani a partire da quel che succede oggi.

Ciò garantisce che i fisici non saranno mai disoccupati. E vengo ora a una questione correlata. Non sono il solo a pensare che la riduzione dimensionale stia diventando un concetto molto importante in tutti i tentativi attuali di costruire delle teorie unificate. Questo significa che il numero di dimensioni dello spazio è essenzialmente un concetto antropomorfo, legato alla limitata scala di energia attuale. In tutte le teorie che abbiamo esaminato finora le dimensioni supplementari sono di tipo spaziale. Più dimensioni temporali porterebbero infatti a violazioni della causalità e/o alla comparsa di tachioni (ovvero particelle più veloci della luce, ndr). Personalmente, trovo che

questa mancanza di simmetria tra tempo e spazio sia fastidiosa. Ma, dopo tutto, possiamo sempre effettuare una rotazione di Wick (una trasformazione che, assegnando al tempo valori immaginari, converte lo spaziotempo di Minkowski in uno spazio euclideo, ndr) ed entrare in un meraviglioso mondo fittizio in cui c'è solo spazio, e io non provo alcun fastidio estetico. Concludo quindi con il mio ultimo principio:

5. Il mondo reale ha solo dimensioni spaziali. Il tempo non è altro che un'illusione antropomorfa. Le teorie dovrebbero essere formulate direttamente in uno spazio (localmente) euclideo, che rappresenta l'entità fondamentale.

Mi rendo conto che tutti questi principi non sono enunciati in un linguaggio matematico appropriato, e che mescolano conoscenza e valori. Spero almeno che risultino divertenti.

Biografia

Tullio Regge (1931-2014) è stato uno dei più grandi fisici teorici della seconda metà del Novecento. Per i suoi studi innovativi nel campo della teoria quantistica degli urti, della relatività generale, della supergravità e della fisica della materia condensata ha ricevuto numerosi riconoscimenti internazionali, tra cui il premio Dannie Heineman, la medaglia Einstein e la medaglia Dirac.

Una tentazione affascinante

Sull'infinito in matematica

di Claudio Bernardi

Secondo Hermann Weyl, matematico tedesco della prima metà del '900, "la matematica è la scienza dell'infinito". Su questa affermazione si può discutere, ma sta di fatto che, a differenza di quanto avviene in altri contesti scientifici, in matematica si parla con tranquillità di infinito.

Fin dalle prime classi della scuola primaria si insegna che ad ogni numero naturale si può aggiungere 1, in modo da ottenere un numero più grande di quello iniziale. Già a questo punto, il bambino capisce che ci sono infiniti numeri naturali. Quando poi si comincia la geometria, si spiega che una retta assomiglia a un filo teso, ma va pensata infinitamente lunga. Un po' più difficile è far capire agli studenti la densità: tra due punti (così come fra due numeri razionali o reali) ne è compreso almeno un altro, e quindi infiniti altri.

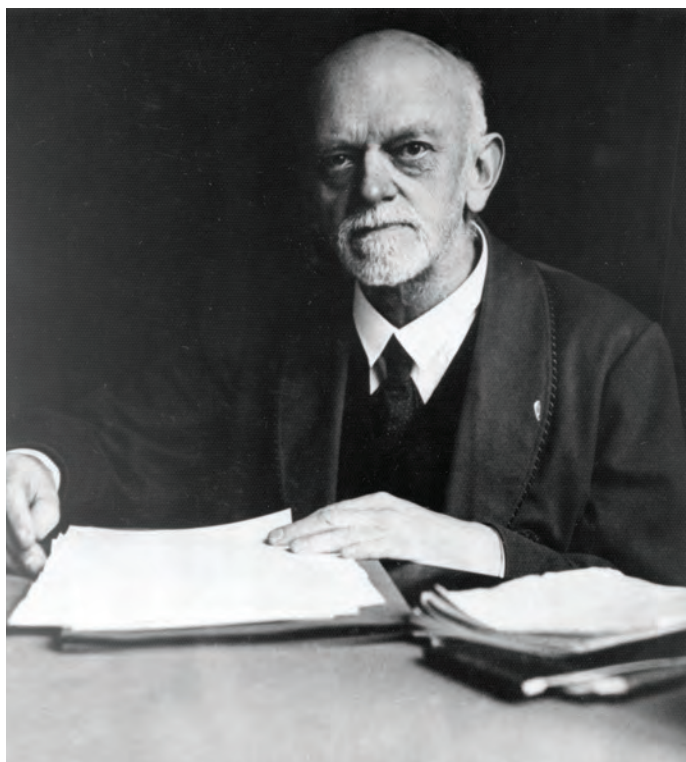
Ma il rapporto dei matematici con l'infinito non è stato sempre tranquillo. Basta ricordare che per Euclide "retta" significava "segmento prolungabile": in altre parole Euclide accettava un infinito "potenziale" (un segmento si può allungare quanto si vuole, ma ogni volta abbiamo a che fare con un segmento), ma non l'infinità di una retta in senso attuale. Le difficoltà con l'infinito nascevano dai paradossi a cui l'accettazione dell'esistenza di insiemi infiniti sembrava inevitabilmente condurre.

Galileo rimane sconcertato dal fatto che i quadrati perfetti sembrano tanti quanti i numeri naturali (ad ogni naturale corrisponde un quadrato, e viceversa), mentre, d'altro lato, i quadrati sono solo una piccola parte dell'insieme dei naturali: anzi, via via che crescono i valori che si considerano, i quadrati diventano sempre più "radi" nell'insieme dei numeri naturali. Galileo si esprime nel modo seguente, quasi suggerendo che è meglio rinunciare a uno studio matematico dell'infinito: "Queste son di quelle difficoltà che derivano dal discorrer che noi facciamo col nostro intelletto finito intorno a gli infiniti, dandogli quegli attributi che noi diamo alle cose finite e terminate; il che penso che sia inconveniente, perché stimo che questi attributi di maggioranza, minorità ed uguaglianza non convenghino a gl'infiniti, de i quali non si può dire, uno essere maggiore o minore o eguale all'altro".

a.

Affresco di Andrea di Bonaiuto, raffigurante Euclide, nel cappellone degli Spagnoli, l'antica sala capitolare della chiesa di Santa Maria Novella a Firenze. Euclide si trova ai piedi della "Geometria". L'affresco fa parte del "Trionfo di San Tommaso d'Aquino": nella parte inferiore si trovano quattordici stalli decorati, nei quali siedono le personificazioni delle sacre scienze e delle arti liberali, ai piedi di ciascuna delle quali si trova un illustre rappresentante.





Anche il grande matematico Carl Friedrich Gauss ebbe a dire: “Io devo protestare nel modo più deciso contro l’uso dell’infinito come qualcosa di compiuto, cosa che non è permessa in matematica. L’infinito non è che una *façon de parler* (modo di dire, ndr)”.

Ma poi, verso la fine dell’800 arrivò Georg Cantor: nella teoria degli insiemi di Cantor si riescono a studiare e confrontare insiemi infiniti, senza cadere in paradossi. Questo permette, oggi, di trattare senza paura insiemi infiniti di numeri (come quello dei numeri reali R e quello dei numeri complessi C), di punti, di funzioni, ecc.

Sempre nella seconda metà dell’800, a opera di Karl Weierstrass e altri, si sistemano in modo rigoroso i concetti alla base dell’analisi matematica: con le celebri formule del tipo “ $\forall \varepsilon > 0 \exists \delta > 0 \dots$ ” (che si legge “per ogni ε maggiore di 0 esiste un δ maggiore di 0”, ndr) si danno definizioni chiare per scritture come $\lim_{x \rightarrow \infty} f(x) = L$ (ovvero “limite di $f(x)$ per x che tende a infinito è uguale a L ”, ndr) e $\lim_{x \rightarrow \infty} f(x) = \infty$ (“limite di $f(x)$ per x che tende a infinito è uguale a infinito”, ndr), e si definisce la “continuità” di una funzione, rinunciando a discutibili variazioni infinitesime delle variabili.

Oggi, in matematica si parla con tranquillità di infinito. Il ricorso all’infinito rende spesso addirittura più semplice lo studio della matematica: in particolare, la teoria delle derivate e degli integrali è più semplice e più potente della teoria delle differenze finite, che si riferisce a funzioni che hanno per dominio un insieme discreto invece che tutto l’insieme R dei numeri reali. In altri casi, accettando l’infinito si ottengono strutture più regolari e più eleganti. Così, aggiungendo a un piano elementare i punti all’infinito (punti “impropri”) si ottiene un piano “proiettivo”, dove si enunciano proprietà generali senza eccezioni e senza che sia necessario distinguere vari casi: due rette distinte hanno sempre uno e un solo punto in comune, due coniche “non degeneri” si possono sempre trasformare una nell’altra, ecc.

Vale la pena di osservare un altro legame fra matematica e infinito, in parte condiviso da altre scienze: una dimostrazione sostituisce infinite verifiche. Pensiamo per esempio al teorema sulla somma degli angoli interni di un triangolo. Per verificare che la somma è uguale a un angolo piatto in tutti i triangoli, anche se avessimo a disposizione strumenti di misura perfetti, dovremmo eseguire infiniti controlli. Invece, una singola dimostrazione ci convince che il teorema è vero in generale, rendendo superflui gli infiniti controlli.

Come disse il grande matematico David Hilbert nel 1921, “L’infinito! Nessun altro problema ha mai scosso così profondamente lo spirito umano; nessuna altra idea ha stimolato così proficuamente il suo intelletto; e tuttavia nessun altro concetto ha maggior bisogno di chiarificazione che quello di infinito”.

Biografia

Claudio Bernardi è professore ordinario di matematica alla Sapienza Università di Roma. Si occupa di logica matematica e di fondamenti della matematica e anche di didattica della matematica. È stato docente alla Ssis e al Tfa, è il responsabile del piano lauree scientifiche per la matematica alla Sapienza e collabora con l’Accademia dei Lincei per iniziative legate all’insegnamento.

b.

Un ritratto del 1937 del grande matematico David Hilbert.

Link sul web

www.dm.unipi.it/~berardu/Didattica/Appunti/scuole060210.pdf

www.treccani.it/vocabolario/infinito/

<http://ed.ted.com/lessons/how-big-is-infinity>

<http://maddmaths.simai.eu/divulgazione/matematica-indispensabile/il-concetto-matematico-di-cui-non-potremmo-fare-a-meno-infinito-di-sandra-lucente/>

Senza confini

Forma e dimensioni dell'universo

di Amedeo Balbi

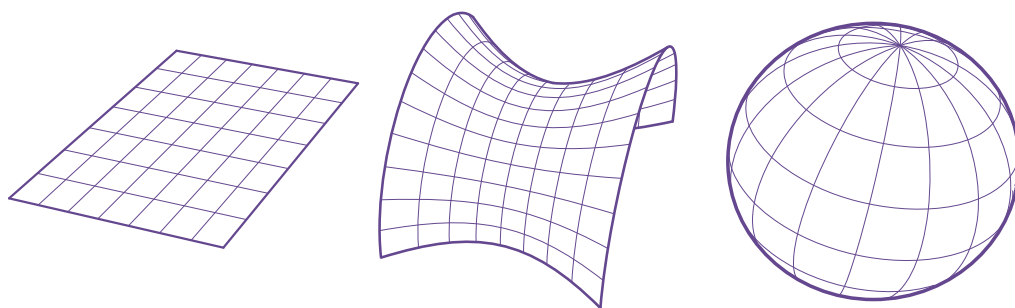
I fisici hanno un cattivo rapporto con l'infinito. Mentre i matematici sono riusciti a domarlo e a convivervi, i fisici ne diffidano e ne sono allarmati: la comparsa dell'infinito in una teoria è, in genere, il segno che qualcosa non va. La cosmologia sembra fare eccezione. Fin dai primi tentativi di trovare una descrizione fisica della struttura complessiva dell'universo e della sua evoluzione, l'eventualità di imbattersi nell'infinito è apparsa inevitabile e, tutto sommato, tollerata. Isaac Newton, nei Principia, considerava lo spazio infinito ed eterno. E quando, stimolato dalle richieste del teologo Richard Bentley, rifletté su quale dovesse essere la distribuzione della materia nell'universo, concluse che l'unica possibilità era che esistesse un numero infinito di stelle, sparse con uniformità nello spazio infinito. La cosmologia newtoniana presentava però grandi problemi concettuali: una distribuzione infinita di materia produceva in ogni punto dello spazio un campo gravitazionale impossibile da calcolare, e la struttura stessa dell'universo era altamente instabile. C'erano, inoltre, conseguenze paradossali: in un universo infinito ed eterno il cielo notturno sarebbe stato completamente coperto di stelle, e avrebbe dovuto brillare come la superficie del Sole.

Quando, nel 1917, Albert Einstein applicò la sua nuova teoria della relatività generale al problema della struttura dell'universo, sembrò per la prima volta che esistesse una soluzione fisica coerente e immune dalla minaccia dell'infinito. Lo spazio poteva curvarsi, e questo permetteva all'universo di essere racchiuso in se stesso – un po' come il globo terrestre, che è finito ma su cui possiamo muoverci in ogni direzione senza mai incontrare limiti. Il fisico Max Born salutò con toni entusiastici il modello cosmologico di Einstein dell'universo chiuso: "Uno spazio finito, ma senza confini, è una delle più grandiose idee sulla natura del mondo mai concepite. Risolve il misterioso problema del perché il sistema delle stelle non si sia disperso e rarefatto, come farebbe se l'universo fosse infinito". Purtroppo, ben presto venne fuori che il modello di Einstein aveva altri problemi e, soprattutto, non si accordava con le osservazioni raccolte dagli astronomi. Le galassie apparivano infatti allontanarsi con una velocità proporzionale alla distanza, e ciò fu infine interpretato come il segno che lo spazio si espandeva: una possibilità contemplata proprio dalla relatività generale, che Einstein aveva però volutamente escluso (vd. fig. b).



a. (vd. p. 21)
Rappresentazione artistica di un multiverso.

b.
Albert Einstein con l'abate Georges Lemaître, lo scopritore della soluzione delle equazioni di Einstein che prevede un universo in espansione. Famosa la frase con cui Einstein, riluttante ad abbandonare il modello di universo statico, accolse questi risultati: "*Vos calculs sont corrects, mais votre physique est abominable*" ("I vostri calcoli sono corretti, ma la vostra fisica è abominevole").



c.

Se l'universo avesse solo due dimensioni spaziali, potrebbe avere la geometria di un piano, di una sella o di una superficie sferica. I primi due casi corrispondono a universi infiniti, rispettivamente "piatti" e "aperti", mentre nel caso sferico l'universo sarebbe finito e "chiuso". Anche nel caso di un universo con tre dimensioni spaziali, come il nostro, sono possibili, in via teorica, tre possibilità analoghe. Il modello originario di Einstein prevedeva un universo chiuso, ma le osservazioni cosmologiche attuali indicano invece che l'universo, almeno fino alle distanze alle quali possiamo osservarlo, sia piatto.

Se lo spazio si espandeva, questo significava che la distanza tra qualunque coppia di punti nell'universo doveva essere stata minore in passato. Estrapolando questa conclusione indietro nel tempo, si andava inesorabilmente incontro a un momento in cui la distanza diventava nulla. In quello stesso istante, qualunque quantità fisica usata per descrivere il contenuto dell'universo – la densità di materia e di energia, la temperatura – sarebbe stata infinita. L'istante iniziale dell'universo – che cominciò a essere chiamato "Big Bang" – sembrava dunque ciò che i fisici chiamano una singolarità: un punto in cui lo spaziotempo stesso cessa di esistere. Le difficoltà concettuali legate a questa singolarità furono però accantonate, dal momento che il modello del Big Bang riusciva comunque a descrivere con grande efficacia, e in accordo con le osservazioni, l'evoluzione dell'universo da istanti molto prossimi al momento iniziale. Nel modello del Big Bang, anche l'estensione spaziale dell'universo può essere, in linea di principio, infinita. Se si assume – coerentemente con il principio copernicano – che non esistono posizioni speciali nello spazio, la relatività generale contempla tre diverse classi di soluzioni per la geometria su grande scala dell'universo. L'universo può essere finito e chiuso su se stesso, in modo simile a una sfera (come nel modello di Einstein), ma anche infinito, come un piano o una sella che si estendono senza limiti (vd. fig. c). In ogni caso, poiché l'universo esiste da un tempo finito, la porzione che ne possiamo effettivamente osservare dalla nostra posizione è, generalmente, finita, delimitata da un orizzonte il cui raggio è pari

alla distanza che la luce può aver percorso dal Big Bang a oggi.

Il modello del Big Bang, nella sua versione più semplice, ci costringe quindi a confrontarci con almeno due tipi di infinito: quello della singolarità iniziale e quello dell'estensione potenzialmente infinita di ciò che esiste al di fuori dell'orizzonte osservabile. Ma le cose si sono fatte ancora più complicate negli sviluppi del modello emersi negli ultimi decenni, e tutt'ora oggetto di indagine teorica e osservativa.

Attorno all'inizio degli anni Ottanta del secolo scorso, emerse un nuovo scenario teorico che sembrava chiarire alcuni aspetti problematici delle condizioni da cui è iniziata l'evoluzione dell'universo. Questo scenario, chiamato inflazione cosmica (vd. in *Asimmetrie* n. 15 p. 37, ndr), prevedeva un periodo di espansione accelerata in un'epoca immediatamente successiva all'ipotetico momento iniziale. Il meccanismo fisico che scatenava l'inflazione era basato su un ingrediente apparentemente molto semplice: l'energia dello spazio vuoto, in grado di esercitare una sorta di azione repulsiva sullo spazio stesso, spingendolo a espandersi. La fase di inflazione aveva, da un lato, l'effetto di "spianare" lo spazio su grande scala, producendo una geometria piatta nell'universo osservabile. Dall'altro, portava alla creazione di piccole disuniformità nella distribuzione iniziale di materia, i "semi" da cui la gravità ha col tempo fatto addensare galassie e ammassi di galassie. Entrambe queste previsioni sono effettivamente in accordo con le osservazioni, e l'idea generica di inflazione è ormai entrata a far parte della descrizione comunemente accettata dell'universo.

Uno degli aspetti attraenti dell'inflazione è che essa permette di eludere il problema della singolarità iniziale. L'universo può emergere da uno spaziotempo pre-esistente, un "vuoto" (il vuoto quantistico) in cui esistono solo i campi che controllano le interazioni fondamentali. Ciò che chiamiamo Big Bang sarebbe dunque solo il risultato di una fluttuazione nell'energia di una microscopica regione di spaziotempo vuoto. L'energia dell'universo non è mai stata infinita, ma solo estremamente grande. Ma se l'inflazione sembra poter cancellare l'infinito dall'istante iniziale, lo stesso non si può dire per l'estensione spaziale dell'universo. Anzi, in questo senso le cose peggiorano. Il meccanismo dell'inflazione è infatti talmente efficace che, una volta innescato, non è facile interromperlo. Nello scenario di inflazione attualmente più popolare, noto come "inflazione eterna" (vd. fig. d), esistono sempre regioni di spaziotempo che si espandono esponenzialmente. Il nostro universo sarebbe così solo una particolare "bolla" di spaziotempo in espansione, ma un'infinità di altri universi sarebbero continuamente generati a

partire da altre regioni di spaziotempo vuoto, fuori del nostro orizzonte. Non solo, ma ciascuno di questi infiniti universi avrebbe diverse caratteristiche fisiche, scaturite dalle condizioni causali presenti nella regione di vuoto da cui esso è emerso. Questa idea di "multiverso" appare, a molti cosmologi, una conseguenza inevitabile delle nostre attuali conoscenze fisiche. Una conseguenza che presenta però enormi problemi concettuali, ancora una volta legati alla presenza dell'infinito. Se infatti esistono infiniti universi con diverse caratteristiche fisiche, prevedere la probabilità di un particolare tipo di universo diventa un compito mal definito – un problema noto in cosmologia come "problema della misura".

Tutto ciò segnala, forse, la difficoltà dei nostri strumenti teorici nel trattare situazioni che vanno ben oltre i loro limiti, e la necessità di trovare una sintesi che inglobi e superi le descrizioni, conflittuali e incomplete, della relatività generale e della meccanica quantistica.

Dopotutto, forse i fisici hanno ragione a diffidare dell'infinito.



d.

Nello scenario dell'inflazione eterna, ogni universo può contenere delle regioni che a un certo punto si espandono esponenzialmente, dando origine a quello che a tutti gli effetti è un altro universo, in cui a sua volta possono generarsi altre inflazioni e altri universi. Il processo potrebbe non aver avuto un inizio (da cui il nome "eterna") ed è uno dei possibili meccanismi per la produzione di un multiverso.

Biografia

Amedeo Balbi, astrofisico, insegna all'Università di Roma Tor Vergata. I suoi interessi di ricerca spaziano dallo studio dell'universo primordiale, al problema delle componenti oscure, all'emergere della complessità e della vita nel cosmo. Attivo da anni anche sul fronte della divulgazione scientifica, è tra l'altro editorialista della rivista *Le Scienze* e autore di diversi libri, l'ultimo dei quali è "Cercatori di meraviglia" (Rizzoli, 2014), vincitore del Premio Nazionale di Divulgazione Scientifica 2015.

Link sul web

<http://www.keplero.org/2009/11/vite-degli-astronomi-9-georges-lemaitre.html>

<http://www.keplero.org/2010/10/quanto-e-grande-luniverso.html>

[as] intersezioni

Liberare il mondo.

di Giulio Giorello

filosofo della scienza

a.

La statua di Giordano Bruno a Campo de' Fiori (Roma), sul luogo in cui nel 1600 è stato arso vivo.



“ELPINO: Come è possibile che l'universo sia infinito? FILOTEO: Come è possibile che l'universo sia finito?” Così si apre il dialogo *De l'infinito, universo e mondi* (stampato presso John Charlwood, Londra 1584) di Giordano Bruno da Nola. In questo teatro delle idee l'autore, che già aveva messo in forma di commedia le peripezie di astrologia, alchimia e magia nel suo *Candelaio* (1582), sviluppa il contrasto tra le prove d'impossibilità rispettivamente dell'infinito e del finito, fino a che Elpino, portavoce sempre più perplesso della cosmologia aristotelica, verrà piegato alle ragioni sempre più convincenti di Filoteo, per il quale “uno dunque è il cielo, il spacio (cioè lo spazio, ndr) immenso, il seno, il continente universale,

l'eterea regione per la quale il tutto discorre e si muove. Ivi innumerabili stelle, astri, globi, soli e terre sensibilmente si veggono, et infiniti ragionevolmente si argumentano”.

Il nome di battesimo di Bruno non era Giordano, ma Filippo, e lui aveva cambiato nome nel prendere quegli ordini cui avrebbe sdegnosamente *abiurato*. Scegliendo “Filoteo” come suo portavoce, aveva forse recuperato e nobilitato il “Filippo” di un tempo, semplicemente tramutando “Colui che ama i cavalli” in “Colui che ama Dio”. Come ha notato Italo Calvinò nelle *Lezioni americane*, l'universo bruniano è senza limite, ma ciascuno degli innumerevoli “mondi” che lo compongono è finito, e “totalmente infinito” è solo Dio.



b.
Urbi et orbi, autore anonimo,
xilografia (pubblicato per la prima
volta in *L'atmosphère: météorologie
populaire* di Camille Flammarion,
Parigi, 1888).

Questo respiro teologico non cancella, anzi esalta la rivoluzione scientifica che il filosofo viene annunciando. Come ha scritto uno dei più brillanti studiosi di Bruno, Miguel A. Granada, il Nolano “non si limitava ad accettare la realtà del cosmo copernicano”, ma mirava a “un universo infinito in atto [...], in quanto effetto unico e totale [...] dell’infinita potenza-bontà-volontà divina”. E non si tratta solo dell’individuazione di un tema che attraverserà il dibattito fisico almeno fino all’Illuminismo, ben oltre la prudenza di Copernico e l’ambiguità di Galileo; ma di un’idea che doveva innervare anche una grande svolta del Novecento. Moritz Schlick, assistente di Max Planck e ammiratore di Einstein, nonché anima del positivismo logico viennese, coglieva nel 1917 la radicalità della sovversione operata da Bruno, trovando un’autentica “liberazione dello spirito” nella concezione del Nolano, per cui le innumerevoli stelle fisse erano

anch’esse soli simili al nostro e stavano sospese nello spazio non limitato da alcuna sfera rigida, non più racchiuso da alcun “globo di cristallo”. All’epoca sostenitore, come anche Einstein, di un universo inteso come varietà chiusa, Schlick riteneva che ciò non cancellasse affatto l’intuizione di Bruno, perché restava cruciale l’assenza di qualsiasi “confine” che delimiti il pur finito universo einsteiniano. Oggi, dopo le teorie evolutive di un universo in espansione, per non dire della proliferazione del multiverso, di cui il nostro universo non sarebbe che una componente particolare, l’intuizione bruniana acquista nuovo vigore nel quadro di una realtà “infinita in ogni direzione”, per usare la pregnante espressione del fisico Freeman Dyson. Non meno rilevante è la ricaduta politica: in un cosmo il cui involucro “non si trova da alcuna parte” non c’è nemmeno un punto centrale assoluto; ma qualsiasi

punto può venire assunto come centro locale. Ciò spazza via ogni pretesa di un potere divinizzato e apre la strada a una politica che situa il carattere mondano delle “repubbliche” nella cornice di una natura inesauribile. Bruno era consapevole che l’abbattimento di ogni “muraglia”, sia astronomica sia politica, avrebbe fatto sì che chiunque l’avesse incontrato avrebbe finito “col morderlo e il divorarlo”. Lo dimostra il rogo in Campo dei Fiori a Roma, il 17 febbraio 1600. E non è forse una coincidenza che Moritz Schlick sia stato assassinato da uno studente filonazista sulle scale dell’Università di Vienna nel 1936. Come intuisce poeticamente Leopardi, quando “del Tirreno / nell’infinito seno / scende la Luna”, il suo calare è immagine della morte di qualsiasi essere umano, mentre “si scolora il mondo” – quello stesso mondo che la filosofia di Bruno aveva contribuito a liberare.

Da qui all'eternità

Limiti alla vita della materia

di Sarah Recchia e Francesco Vissani

Il fatto che la natura sia in continuo mutamento trova molti riscontri in tutti i campi della scienza. Ad esempio, al contrario di quel che comunemente si ritiene, un diamante non è per sempre. Infatti, i geologi spiegano che la gran parte dei diamanti che troviamo in gioielleria ha un'età di 1-2 miliardi di anni e che un diamante può bruciare. Anche il pianeta che ci ospita ha avuto un'origine circa 4,5 miliardi di anni fa e si trasforma nel tempo. Lo stesso si può dire del Sole che ci illumina, il quale, come è noto dalla fisica nucleare, è destinato a spegnersi tra circa 5 miliardi di anni. E l'universo sembra abbia avuto un'origine, circa 14 miliardi di anni fa, presumibilmente con il ben noto Big Bang.

E cosa succede agli atomi e alle particelle che li costituiscono: nuclei atomici, elettroni, protoni, neutroni o quark? Hanno avuto origine in qualche remoto istante o esistono da sempre? Possono essere distrutti o dureranno all'infinito? Nasce insomma la domanda se anche queste particelle possano nascere o morire, o se (almeno loro) siano eterne.

Gli esperimenti hanno osservato numerosissime trasformazioni tra particelle. Studiandole attentamente si è imparato che, prima e dopo ogni trasformazione, esistono certe quantità che restano immutate. Una di queste è proprio l'energia: il fatto che essa non cambi mai ha un significato molto profondo. Un'altra di queste quantità è la carica elettrica: anche in questo caso, le verifiche hanno un altissimo grado di precisione. Si usa parlare di leggi di conservazione dell'energia e della carica elettrica (vd. in *Asimmetrie* n.19 p. 7, ndr): esse sono tra le basi più solide della fisica che conosciamo.

Alcuni scienziati hanno proposto di includere tra le leggi immutabili il fatto che la materia sia esattamente stabile, un fatto non contraddetto da nessuna osservazione nota. A favore di questa posizione c'è la migliore teoria che i fisici delle particelle abbiano mai costruito, il modello standard delle particelle e delle interazioni elementari. Ma il fenomeno dell'oscillazione dei neutrini, da pochi mesi riconosciuto dal premio Nobel della fisica del 2015, contraddice la sua predizione che i neutrini siano privi di massa e dimostra che la realtà osservabile non si esaurisce nel modello standard. Esistono vari modelli teorici che estendono il modello standard, che possono dar conto dell'oscillazione dei neutrini e nei quali la materia nota non è esattamente stabile. Questi modelli portano a contemplare la possibilità che la materia "non sia per sempre", ma che essa possa essere creata o distrutta. Alcuni di essi spiegano perché l'universo contiene una ben precisa quantità di materia ordinaria e pochissima antimateria

a.
È possibile bruciare i diamanti immergendoli in una conca di grafite riempita con ossigeno liquido.



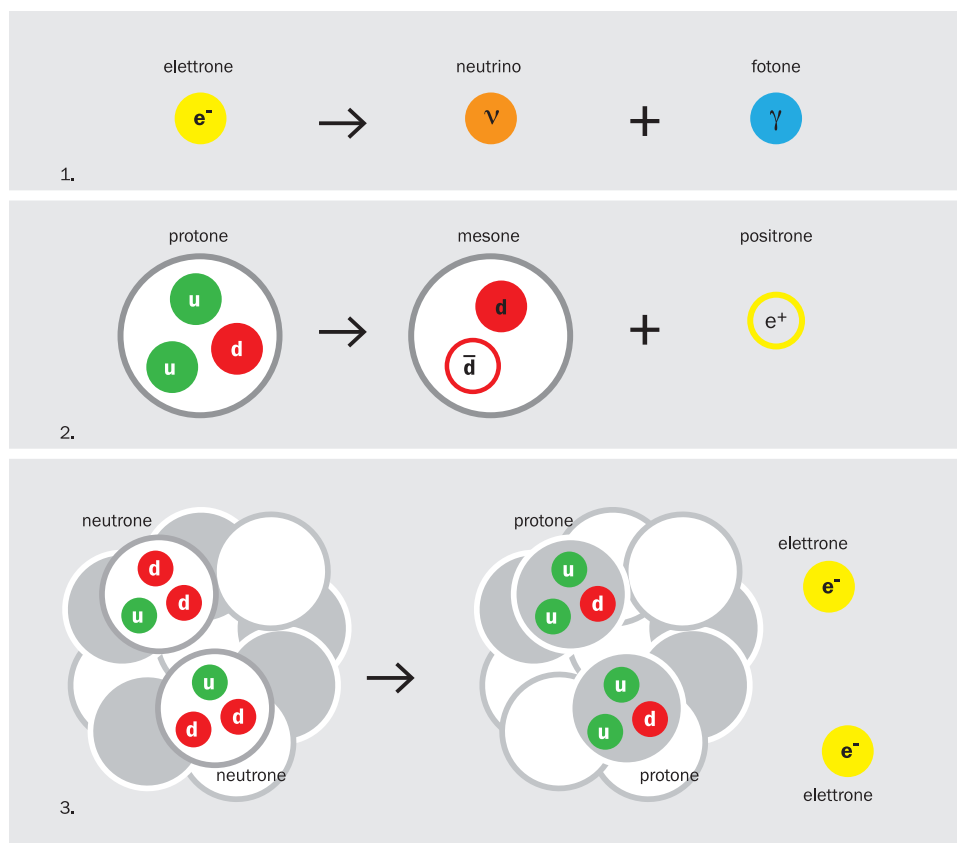
(vd. in Asimmetrie n. 7 p. 22, ndr), un fatto che il modello standard non riesce in alcun modo a giustificare. Detto in altre parole, questi modelli ci permettono di investigare l'origine della materia, e per questo sono considerati con enorme interesse.

In questo modo, nasce l'affascinante idea di verificare queste ipotesi in laboratorio. Esistono dei processi di trasformazione osservabili, in cui le particelle di materia sono create o distrutte? Parliamo proprio di quelle particelle che compongono gli atomi e che tutti conoscono, come gli elettroni o i nuclei. Descriviamo nel seguito tre tipi di esperimenti con i quali queste idee sono state messe alla prova. Ipotizziamo che l'elettrone decada. Per conservare l'energia, esso si dovrebbe trasformare in particelle più leggere e quelle disponibili sono poche. Il caso più semplice è che esso decada in un neutrino e in un fotone (vd. fig. b1): in questo caso, entrambi acquisterebbero un'energia pari alla metà della massa dell'elettrone, cioè pari a circa 250 keV. L'esperimento Borexino nei Laboratori del

Gran Sasso dell'Infn (Lngs) ha escluso la presenza di fotoni con questa energia, ponendo il miglior limite mai ottenuto sul decadimento dell'elettrone. Questo risultato è rassicurante, anche perché, nel caso contrario, si sarebbe dovuto prendere atto di un processo in cui la carica elettrica scompare: infatti, né il neutrino né il fotone hanno alcuna carica elettrica. Insomma, al meglio delle conoscenze attuali, possiamo dire che l'elettrone vive per un tempo infinito. Un caso più intrigante riguarda la ricerca della stabilità del nucleo dell'idrogeno, e cioè del protone. Esistono molte possibilità che qualcosa del genere avvenga, senza dover mettere a repentaglio la conservazione dell'energia o della carica elettrica. Uno degli ipotetici ma più interessanti processi di decadimento del protone, previsto in certe estensioni del modello standard, è quello mostrato in fig. b2. Le due particelle nello stato finale sono un mesone neutro, che si disintegra rapidamente, e un positrone che in laboratorio si annichila con un elettrone.

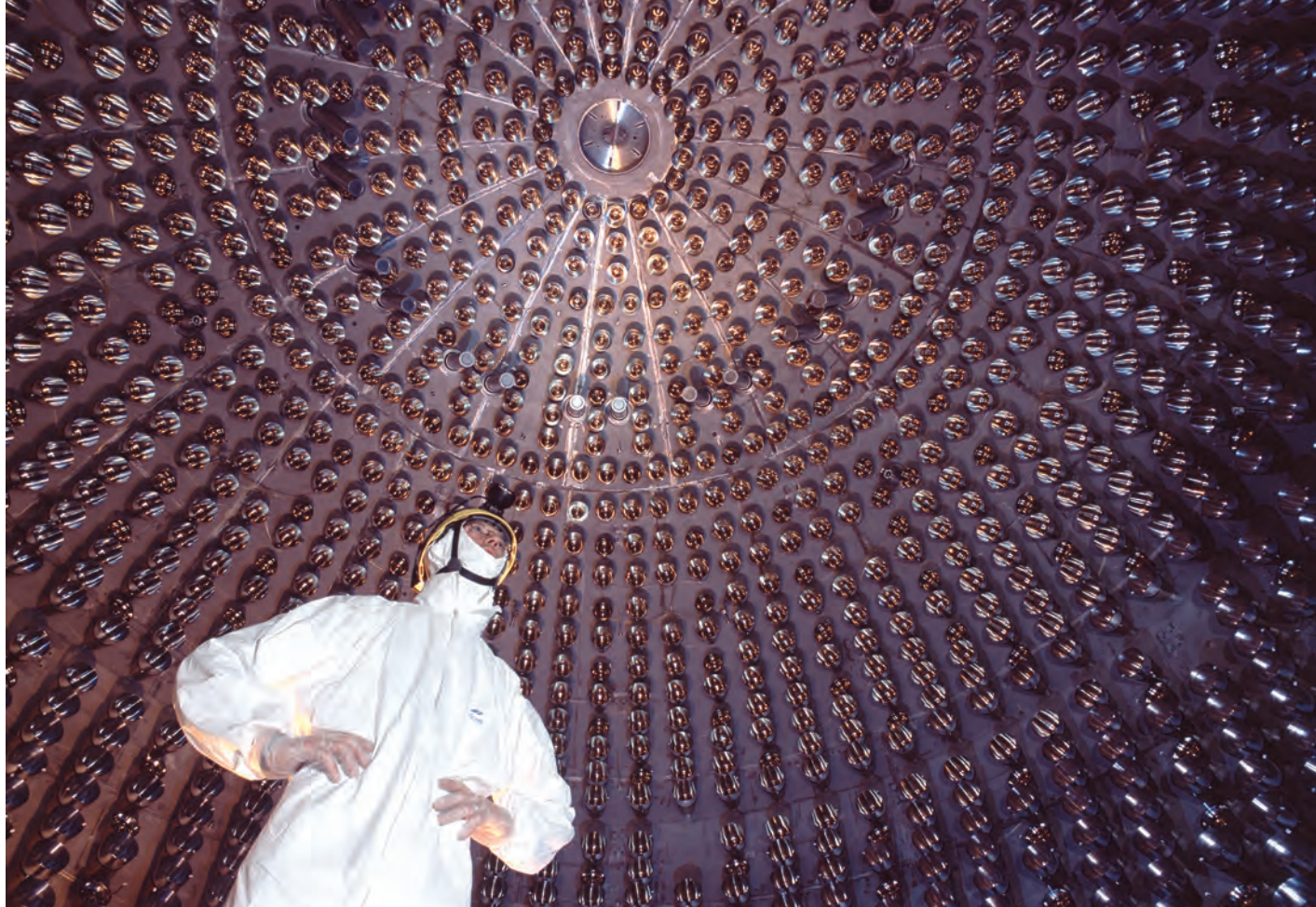
Del protone iniziale, resterebbe solo un osservabile fiotto di energia.

Le prime ricerche sperimentali furono condotte da un *dream team* composto dal premio Nobel Fred Reines e da Clyde Cowan e Maurice Goldhaber sin dagli anni '50. I tre stabilirono che la durata della vita del protone fosse maggiore di circa 10^{21} anni. Le ricerche più recenti sono quelle dovute all'esperimento Super-Kamiokande in Giappone, noto per aver misurato anche l'oscillazione dei neutrini (vd. in Asimmetrie n. 14 p. 29, ndr). I colleghi giapponesi hanno tenuto sotto controllo svariate decine di migliaia di tonnellate di acqua iper-pura per molti anni, senza che si verificasse alcun evento di questo tipo; in questo modo, hanno fissato il limite inferiore della vita media del protone a $8,2 \times 10^{33}$ anni. Per apprezzare meglio questo risultato, ricordiamo che il valore dell'età dell'universo è dell'ordine di 10^{10} anni! Fino a questo punto abbiamo ipotizzato solamente la distruzione di elettroni o di protoni. Esiste un processo osservabile in laboratorio in cui qualche particella viene



b. In questa figura, approfondiamo la descrizione di alcune ipotetiche trasformazioni tra particelle elementari, previste in certe estensioni del modello standard.

- 1) Il processo di distruzione di un elettrone in un neutrino e un fotone, che viola la conservazione della carica elettrica.
- 2) Il processo in cui un nucleo di idrogeno scompare, detto anche "decadimento del protone". Il numero netto di quark passa da tre (valore nello stato iniziale) a zero, siccome nello stato finale abbiamo un quark e un antiquark.
- 3) Il processo di creazione di due elettroni in una transizione nucleare, detto anche "doppio decadimento beta senza neutrini". In questo processo il numero di quark resta immutato.



creata con un processo non previsto nel modello standard? C'è almeno un caso, considerato molto promettente, che riguarda una specifica trasformazione tra nuclei atomici prevista dalla teoria di Majorana delle masse dei neutrini e chiamato "doppio decadimento beta senza neutrini" (vd. in *Asimmetrie* n. 15 p. 27, ndr). In questa trasformazione vengono creati due elettroni. Il nucleo finale ha due unità di carica positiva in più, che sommate alle due unità di carica negativa degli elettroni, fanno sì che la carica elettrica resti esattamente immutata (vd. fig. b3). Ci sono molti esperimenti alla ricerca di questa trasformazione: tra i più importanti, ricordiamo Gerda e Cuore dei Laboratori del Gran Sasso (Lngs), che utilizzano nuclei di germanio e tellurio. Essi hanno ottenuto dei limiti stringenti sulla probabilità che

questo ipotetico processo avvenga. Per esempio, sappiamo che i nuclei di germanio vivono almeno 3×10^{25} anni senza che esso abbia luogo. Insomma, abbiamo imparato che il processo di creazione di elettroni, se esiste, avviene con tempi molto lunghi, almeno negli esperimenti di laboratorio. In conclusione, possiamo dire che i fisici hanno raccolto qualche indizio, ma nessuna prova certa, a suffragio dell'ipotesi che la materia non sia esattamente stabile. In altre parole, possiamo pensare che un elettrone o un protone, lasciati a se stessi, siano senza data di nascita o timbro di scadenza e che vivano per sempre. Nel prossimo futuro, si conta di procedere ulteriormente nella ricerca, nella speranza di riuscire a misurare domani quello che oggi riteniamo essere un infinito.

Biografia

Sarah Recchia è una studentessa di dottorato (PhD) in Astroparticle Physics presso il Gran Sasso Science Institute (Gssi). Laureata presso la Sapienza Università di Roma. La sua attività di ricerca è incentrata principalmente sulla fisica dei raggi cosmici.

Francesco Vissani è ricercatore Infn presso i Laboratori del Gran Sasso e coordinatore del PhD in Astroparticle Physics presso il Gssi.

c.
L'esperimento Borexino nei Laboratori del Gran Sasso, che ha studiato recentemente la stabilità dell'elettrone.

Link sul web

http://ithaca.unisalento.it/nr-6_2015/articolo_llp_06.pdf

Per qualche sigma in più

Metodi statistici in fisica delle particelle

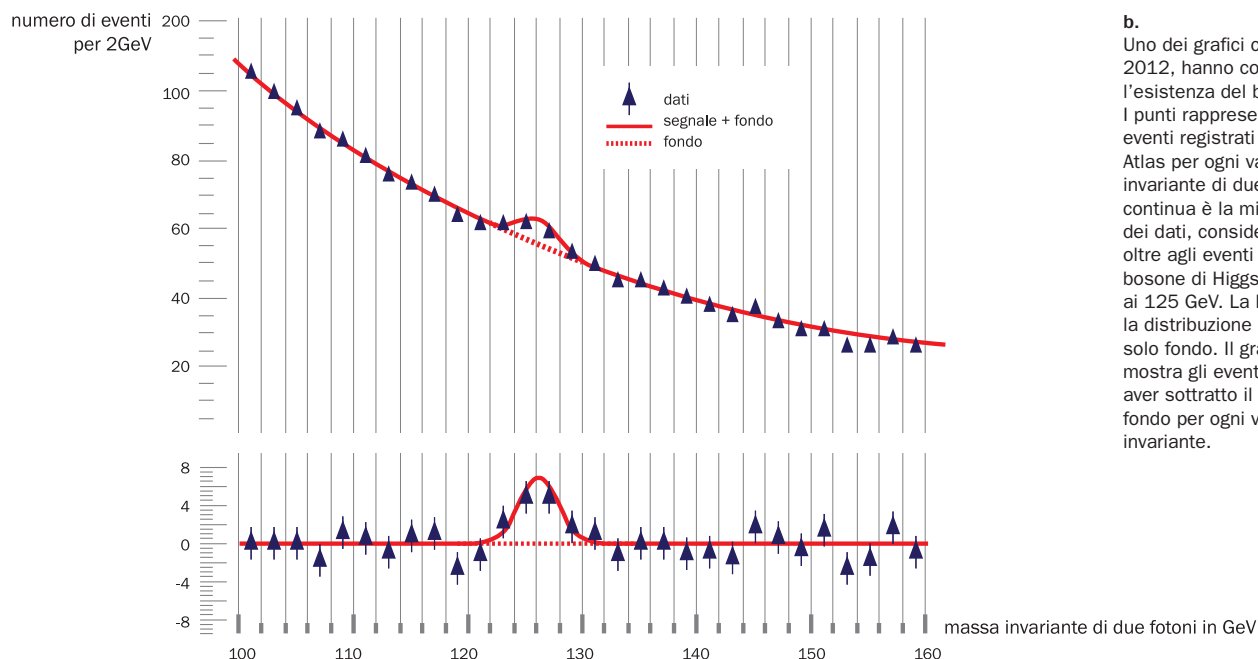
di Concezio Bozzi

a.
Uno scorcio dell'esperimento
Atlas al Cern.



Il sogno di ogni fisico sperimentale è di poter lavorare con una “statistica infinita”, vale a dire con campioni di dati grandissimi che permettono di misurare le variabili osservabili sotto studio (chiamate dai fisici semplicemente “osservabili”) con incertezze trascurabili. Esiste infatti un’incertezza “statistica” in ogni misura di fisica, che dipende dalla dimensione dei dati analizzati e che si riduce in proporzione all’inverso della radice quadrata delle dimensioni del campione analizzato. Più grande è il campione, minore sarà l’incertezza statistica, e più facile sarà stabilire la verità o la falsità di un’ipotesi, come per esempio l’esistenza di nuove particelle o di nuovi processi al di là di quello che è comunemente noto come modello standard. In pratica, esistono parecchi fattori che limitano la grandezza dei campioni a nostra disposizione. Tanto per cominciare, il tempo a nostra disposizione è necessariamente finito. Potremmo “aumentare la luminosità” costruendo acceleratori che siano in grado di fornire più collisioni al secondo e realizzando rivelatori che siano in grado di raccogliere i risultati di tutte queste collisioni. Tuttavia, i processi più interessanti sono anche molto rari, per cui anche con acceleratori ad altissima luminosità rimaniamo con un campione di dati esiguo, in cui le fluttuazioni statistiche potrebbero indurci a credere di vedere qualcosa di nuovo, quando in realtà abbiamo a che fare solamente con processi noti. Cerchiamo di approfondire con un esempio concreto.

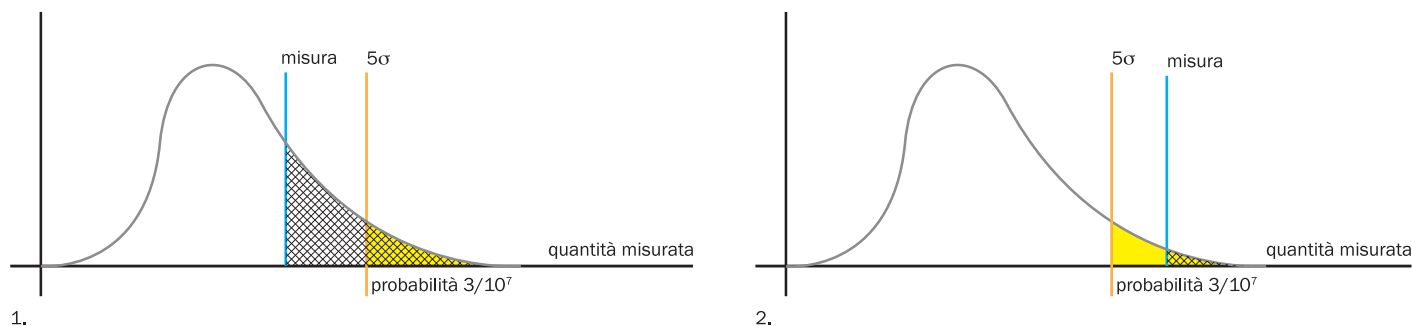
Il 4 luglio 2012 viene annunciata al Cern la scoperta del bosone di Higgs. La scoperta viene fatta tramite studi il cui risultato si può esemplificare con il grafico in fig. b. Nel grafico si riporta la distribuzione di una variabile, che i fisici chiamano “massa invariante” (vd. in Asimmetrie n. 19 p. 16, ndr), ottenuta mediante un’analisi effettuata su particelle rivelate dall’apparato sperimentale (due fotoni nel caso della fig. b), e successivamente ricostruite e selezionate. Se le particelle provengono dal decadimento di un’altra particella, allora questa analisi dà invariabilmente la massa di questa particella, entro gli errori sperimentali, e quindi un picco nel grafico. Il grafico di fig. b mostra effettivamente un picco di “segnale” e un “fondo” monotonamente decrescente al di fuori.



b.
Uno dei grafici che, nel luglio 2012, hanno confermato l'esistenza del bosone di Higgs. I punti rappresentano il numero di eventi registrati dall'esperimento Atlas per ogni valore della massa invariante di due fotoni. La linea continua è la miglior descrizione dei dati, considerando che esista, oltre agli eventi di fondo, anche un bosone di Higgs con massa intorno ai 125 GeV. La linea tratteggiata è la distribuzione attesa nel caso di solo fondo. Il grafico inferiore mostra gli eventi che restano dopo aver sottratto il numero di eventi di fondo per ogni valore di massa invariante.

Osserviamo però come il picco non sia così distinto dal fondo – siamo sicuri di aver scoperto una nuova particella? Oppure forse si tratta semplicemente di una fluttuazione? Se osserviamo la distribuzione dei punti sperimentali attorno alla linea tratteggiata, che rappresenta la nostra stima migliore del fondo, vediamo che essi fluttuano un po' sopra e un po' sotto – potrebbe essere perfettamente plausibile che due punti vicini fluttuino entrambi positivamente e simulino un picco. Come ne usciamo? Innanzitutto notiamo che due esperimenti distinti, Atlas e Cms, osservano un eccesso rispetto al fondo esattamente nello stesso punto del grafico. Diventa già un poco meno plausibile che si tratti di una fluttuazione. Inoltre, possiamo ricostruire un decadimento in particelle diverse da quelle utilizzate per ottenere la fig. b. Otteniamo di nuovo un eccesso rispetto alla previsione per il fondo, sempre nello stesso punto. Il passaggio fondamentale è che riusciamo ad avere una stima quantitativa di quanto sia probabile che i processi di fondo producano quanto osservato sperimentalmente. Mettendo tutto assieme, giungiamo alla conclusione che questa probabilità è minore o uguale a 3 parti per dieci milioni, che è il limite convenzionale (le famose "5 sigma") che i fisici utilizzano per stabilire che c'è qualcos'altro oltre il fondo: una scoperta.

Ricapitoliamo: abbiamo aggiunto i dati raccolti da più esperimenti e abbiamo aggiunto più modi di decadimento della particella di cui siamo a caccia. In altri termini, abbiamo reso il nostro campione statisticamente più significativo. Poi abbiamo definito un cosiddetto "livello di confidenza" dei nostri risultati, dicendo che se l'ipotesi dell'esistenza dei soli processi di fondo fosse vera, e ripetessimo l'esperimento dieci milioni di volte, allora otterremmo quanto osservato sperimentalmente al massimo 3 volte. Come facciamo a stabilire questo? Per fortuna abbiamo degli strumenti che ci aiutano a lavorare anche con un campione di dati finito, e uno dei più potenti a nostra disposizione è la possibilità di simulare i processi sotto esame, in maniera del tutto analoga a come li ricostruiremmo nei nostri rivelatori, con il vantaggio di poter ottenere campioni molto più grandi di quanto qualsiasi acceleratore possa fornire. Per fare ciò alla scala richiesta dagli esperimenti a Lhc utilizziamo la Grid, l'infrastruttura di calcolo distribuita (vd. in Asimmetrie n. 13 p. 21, ndr). Il modo in cui stimiamo il livello di confidenza di un'ipotesi utilizza proprio grandi campioni di dati che sono simulati secondo l'ipotesi sotto esame. Le simulazioni in questione sono dette "giocattolo". Infatti anche l'enorme potenza di



calcolo della Grid non basta a simulare in dettaglio tutte le interazioni che le particelle produrrebbero nei nostri rivelatori, e ci si deve accontentare di parametrizzare unicamente le distribuzioni finali delle osservabili misurate, per esempio la massa invariante o il numero di volte in cui si verifica un processo ritenuto raro o impossibile (vd Asimmetrie n. 15 p. 15, ndr). Anche con questi limiti, si tratta di una simulazione che costituisce un modo pratico e sufficientemente accurato per capire quanto sia affidabile la verifica di un'ipotesi e che genere di incertezze siano legate al campione di dati reali a nostra disposizione. Nella simulazione, generiamo un numero altissimo di campioni, ciascuno statisticamente equivalente a quello raccolto dall'esperimento. Ciascun campione è generato in base all'ipotesi sotto esame – processi di solo fondo, oppure processi in cui oltre al fondo c'è anche il segnale. Effettuiamo la nostra analisi su ciascun campione, e facciamo la distribuzione dei risultati ottenuti. È come se avessimo ripetuto il nostro esperimento un numero di volte pari al numero di campioni simulati. Confrontiamo adesso il risultato ottenuto sui dati reali con la distribuzione dei risultati simulati. Se lo troviamo parecchio al di fuori di quanto previsto in base all'ipotesi che stiamo testando, allora possiamo rigettare questa ipotesi, con un livello di confidenza pari alla frazione dell'area della distribuzione che si trova oltre il valore osservato sperimentalmente (vd. fig. c). La simulazione è inoltre utile per capire quali sono le incertezze sistematiche sulla nostra misura, dovute ad esempio all'incertezza con cui

conosciamo la nostra ipotesi di “test” oppure all'incertezza con cui conosciamo la risposta dei nostri rivelatori alle particelle che li attraversano. Infine, la stessa tecnica consente una stima delle incertezze in processi intrinsecamente non ripetibili. Ad esempio, le osservazioni cosmologiche utilizzano l'intero universo come laboratorio, e non c'è modo di ripetere l'esperimento. Tutte le osservazioni cosmologiche hanno un'incertezza osservativa che viene generalmente indicata come “varianza cosmica”, e che può essere stimata con tecniche simili.

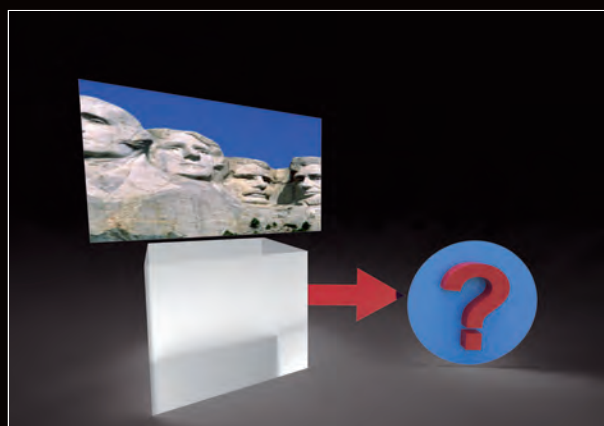
Un altro concetto importante nelle nostre misure è quello di “purezza”, definita come la frazione di eventi di segnale presenti nel nostro campione complessivo. A parità di segnale, un campione più puro sarà anche statisticamente più significativo o, equivalentemente, un campione più piccolo ma più puro sarà statisticamente equivalente a un campione più grande e meno puro. Tornando di nuovo alla fig. b, il picco risulterebbe molto più convincente se il fondo fosse cento volte minore. Riusciamo a fare questo? Negli ultimi anni i fisici delle particelle hanno imparato a utilizzare con successo tecniche di *machine learning* in uso in campi del tutto diversi, come la classificazione delle immagini o la diagnostica medica. In fin dei conti, la separazione tra segnale e fondo nei nostri esperimenti è un problema concettualmente equivalente a quello del riconoscimento facciale, affrontato e brillantemente risolto nei programmi di fotografia esistenti su qualsiasi smartphone (vd. approfondimento).

c.
Nello studio dei processi rari una delle osservabili interessanti è il numero di eventi prodotti dal processo raro in questione (il segnale). Questo numero deve essere confrontato con quello dovuto a processi diversi e in generale meno rari (il fondo). Attraverso le simulazioni “giocattolo” si può produrre molte volte un possibile risultato dell'esperimento nel caso che ci siano solo eventi di fondo (la curva in figura). L'area corrispondente alla parte di curva superiore a un determinato valore della quantità misurata indica la probabilità che un risultato maggiore o uguale a tale valore sia dovuto all'esistenza del solo fondo. Per affermare che il valore misurato non può essere prodotto dal solo fondo, i fisici hanno scelto il limite convenzionale di 3 parti per dieci milioni (le famose 5 sigma) indicate dall'area gialla in figura. L'area tratteggiata in figura esprime invece la probabilità di ottenere un valore maggiore di quello misurato. Nel caso indicato in 1) la misura è compatibile con l'esistenza di solo fondo, mentre in 2) possiamo affermare che il solo fondo non è sufficiente a spiegare la misura, che può essere quindi giustificata solo con l'esistenza di un segnale dovuto al processo raro.

Indovina chi

1.
Schema di funzionamento di un classificatore
(rappresentato in figura dalle scatole).

Vi è mai capitato di postare foto su Facebook e di vedere apparire l'invito a "taggare" i volti dei vostri amici, magari con il suggerimento del nome "è Stella? è Giovanni?". Come fa Facebook a sapere che in una foto sono ritratte delle persone e addirittura a riconoscerle? Le tecniche utilizzate fanno uso di "reti neurali", o più genericamente di cosiddetti "classificatori", che sono capaci di imparare a distinguere, a riconoscere le forme (in inglese *pattern recognition*). Per insegnare a un classificatore a riconoscere i volti (che sono il nostro "segnale") bisognerà fargli prima analizzare varie immagini di volti, e solo quelle. Il classificatore per esempio imparerà che in un volto ci devono essere due occhi, un naso e una bocca. Che ci possono essere i capelli, ma non è sempre detto, che ci possono essere dei baffi, e così via... In una seconda fase sarà necessario passare al classificatore solo immagini che non sono volti (cioè sono il nostro "fondo"): scorci di mare, montagne, automobili,... Alla fine del processo di apprendimento, il programma di classificazione produrrà un algoritmo, capace di analizzare un'immagine e calcolare la probabilità che questa raffiguri un volto (segnale) o qualcos'altro. Il risultato è una probabilità, perché c'è sempre una certa frazione di casi in cui l'algoritmo sbaglia, invitandovi a "taggare" il volto di un amico dove c'è in realtà una parete rocciosa, o non riconoscendo che un'immagine ritrae una persona. Questo può capitare perché la roccia può avere dei tratti che ricordano la struttura minima di un volto (occhi, naso, bocca) oppure perché la persona è ritratta di profilo. Gli algoritmi migliori sono quelli che sono stati "allenati" su un enorme numero di "segnali" (anche molto particolari, come una persona di spalle) e di "fondi" (montagne a forma di testa o macchine decorate con una faccia). Negli ultimi anni i fisici hanno iniziato a usare le stesse tecniche per distinguere il segnale, il raro evento cercato, dal fondo, i tanti eventi quasi uguali al segnale. Nel loro caso i classificatori vengono allenati su grandi campioni di dati simulati, sia di segnale che di fondo. Come nel caso delle immagini, il risultato non è mai sicuro al cento per cento, ma l'uso intelligente di queste tecniche ha permesso ai fisici di ottenere molta più informazione sui campioni di dati raccolti e di testare la validità di un'ipotesi o l'accordo dei dati con la teoria. [Barbara Sciascia]



Biografia

Concezio Bozzi è primo ricercatore presso la sezione Infn di Ferrara, attualmente in congedo presso il Cern. Ha partecipato a esperimenti al Cern e a Slac. Si interessa di fisica del *flavour* e di calcolo scientifico. Svolge attualmente la sua attività di ricerca nell'esperimento Lhcb. È stato membro di comitati di valutazione della ricerca presso l'Infn, il Cern e il Department of Energy degli Usa.

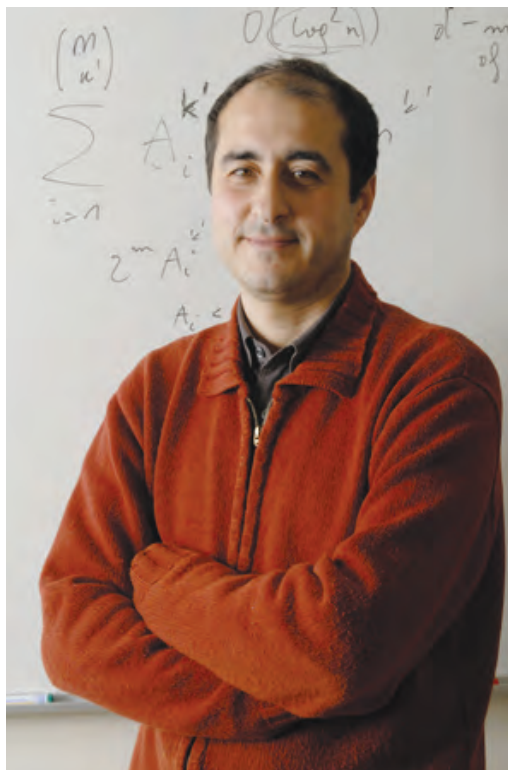
Link sul web

<http://blogs.scientificamerican.com/observations/five-sigmawhats-that/>
<http://scikit-learn.org>

[as] riflessi

Tutto in un click.

di Vincenzo Napolano



Si chiamano Big Data. È l'enorme quantità di dati digitali, che grazie alla rivoluzione del web prima e a quella dei dispositivi mobili poi, tutti noi contribuiamo a generare su tutto il pianeta e senza sosta. Ma non solo. Accanto ai dati della miriade di pagine web, email e comunicazioni private ci sono quelli prodotti e memorizzati ogni giorno in tutto il mondo, ad esempio in ambito medico, dai sistemi di sicurezza o dalla ricerca scientifica. Il Large Hadron Collider del Cern è famoso anche per questo: per la strabiliante quantità di dati prodotti ogni giorno dalle collisioni di particelle nell'acceleratore più grande mai realizzato dall'uomo. Pari ogni anno a centinaia di milioni di gigabyte. “La differenza principale tra i dati di Lhc e quelli prodotti in continuazione dalla

rete – ci spiega Stefano Leonardi, presidente del Consiglio del corso di studi in Data Science della Sapienza Università di Roma – è che i primi possono essere memorizzati e poi esplorati in modo relativamente più ordinato e rapido”. Basandosi sui modelli teorici, i fisici hanno realizzato dei sistemi elettronici, in grado di riconoscere tra i nuovi dati generati ogni milionesimo di secondo nell'acceleratore quelli privi di informazioni utili, scartandoli in modo automatico. Nonostante questo, naturalmente, la mole di dati da archiviare e poi trasmettere ai ricercatori di mezzo mondo resta immensa, e per questo è stata costruita una rete planetaria di calcolo parallelo: la Grid (vd. in Asimmetrie n. 13 p. 21, ndr).

Il volume dei dati generati dalla rete è però ancora più grande. Se consideriamo che ogni minuto gli utenti di Facebook condividono 2 milioni e mezzo di post, quelli di Twitter twittano circa 300 mila volte, su Youtube vengono caricate 72 ore di video, Google riceve circa 4 milioni di richieste e si inviano 200 milioni di email, abbiamo un'idea più concreta della quantità di dati in gioco. Per stimarla si parla di “zettabyte”, ovvero mille miliardi di gigabyte: dati destinati a crescere in modo esponenziale nei prossimi anni e che vorremmo continuare a esplorare in pochi istanti, come facciamo oggi. “Il web genera per sua natura in continuazione dati distribuiti su tutto il pianeta, – continua Leonardi – che per altro sono costantemente interrogati ed esplorati da milioni di utenti. Per rendere possibile una ricerca di contenuti istantanea, come quella ad esempio dei motori di ricerca, il problema non è solo la straordinaria quantità dei dati, ma anche il modo complesso e dinamico in cui sono prodotti, i loro mille formati possibili e la diversa qualità e rilevanza”. Anche se a noi sembra un semplice click, i motori di ricerca nascondono in realtà algoritmi estremamente sofisticati, in grado di scandagliare contenuti praticamente infiniti, e sempre diversi, in pochi istanti. “Per fare questo – ci spiega ancora Leonardi – si

a.
Stefano Leonardi, presidente del Consiglio del corso di studi in Data Science della Sapienza.

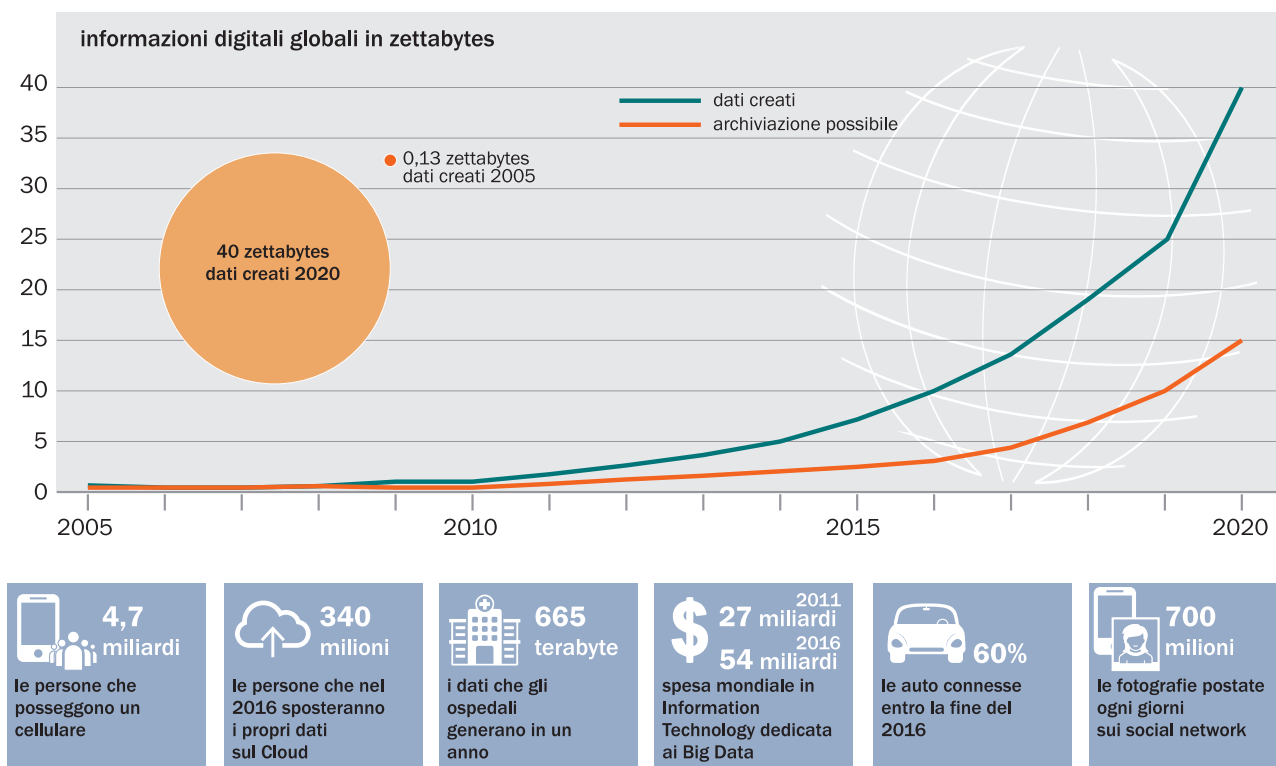
utilizza quella che si chiama *fingerprint*, l'impronta di una pagina web: una minima quantità di informazioni, a partire da cui si può ricostruire con metodi statistici il suo contenuto integrale. Così gli algoritmi di ricerca possono riconoscere le pagine, ad esempio per determinare contenuti simili o duplicati analizzando una quantità di informazioni molto minore di quella che poi ci forniranno alla fine". Del resto anche ognuno di noi ha una sua impronta digitale in rete, costruita a partire dai dati di navigazione o dai nostri profili sui social network. Anche in questo caso si tratta di una miriade di dati, impossibile da esplorare in modo analitico, e perciò archiviati e utilizzati con un processo statistico. L'efficacia di questo metodo è lampante, se pensiamo alla personalizzazione delle pubblicità online o delle raccomandazioni dei social network, in cui ci imbattiamo ogni giorno.

"La variabilità e distribuzione planetaria dei dati della rete, oltre che la loro quantità, ha finito per trasformare anche lo stesso modo in cui vengono memorizzati e trasmessi i dati. Oggi

l'ambiente informatico nel quale vive la rete è il Cloud, dove potenzialmente ogni nodo è in comunicazione con ogni altro. Le informazioni non sono immagazzinate in modo predefinito e gerarchico, ma secondo priorità variabili, così da adeguarsi in tempo reale alle richieste della rete". Anche il mondo della scienza guarda con interesse a questo modello. In un prossimo futuro la Grid potrebbe essere affiancata da un Cloud più flessibile e adattabile a esigenze di discipline diverse, in cui non solo i fisici delle particelle (già attivi con il progetto Indigo Data Cloud, coordinato dall'Infn), ma anche i biologi, gli economisti, gli storici ecc. condivideranno risorse di memoria e si scambieranno dati. "Qualcosa del genere – conclude Leonardi – è già disponibile, in misura più limitata, per ognuno di noi. Al di là dello straordinario accesso alle informazioni che ci offre la rete, già oggi tutti noi possiamo inventare una app e testarla, ad esempio, sui server di Amazon o Apple. Se funziona, poi, potremmo renderla disponibile a milioni di altre persone. Questo a me sembra semplicemente fantastico".

b.

Il volume dei dati prodotti nel mondo cresce esponenzialmente: si stima che nel 2020 si arriverà a 40 mila miliardi di gigabyte, in gergo 40 zettabyte. La capacità di archiviare tutte queste informazioni in supporti fisici – come gli hard disk e le memorie – è molto più limitata e costosa. La sfida è quella di selezionare e conservare le informazioni sulla base di criteri come qualità e rilevanza, per poter continuare a eseguire la ricerca dei dati di interesse in tempi brevissimi.



fonte dati Sole24Ore

Oltre i limiti

Divergenza in termodinamica

di Vincenzo Greco



Può esistere una temperatura infinita, un'energia infinita, una pressione infinita? Diremmo di no, perché tutto ha un limite nell'esperienza che facciamo del mondo che ci circonda. Certo si possono avere energie molto grandi – ma “infinite”, cosa vuole dire? Ci sono almeno due modi in cui l'infinito entra in gioco. Il primo, noto come “limite termodinamico”, appare quando si studia l'evoluzione temporale di un sistema formato da un numero grandissimo di particelle (molecole, atomi, nucleoni o quark). Il secondo, forse ancora più affascinante, appare quando anche le variabili termodinamiche tendono, matematicamente, all'infinito.

Più in dettaglio, il limite termodinamico è il comportamento di un sistema fisico quando si considera che il suo numero di particelle N e il suo volume V diventano infinitamente grandi, mantenendo però il rapporto tra N e V – cioè la densità del sistema che vogliamo studiare – pari a un numero finito. Questo limite all'infinito ci permette di studiare con estrema precisione le proprietà di un gas, di un liquido o di un plasma. La motivazione di fondo per questa possibilità risiede nel fatto che la struttura della materia è tale che quasi tutti i sistemi che ci circondano, anche se non contengono un numero infinito

di particelle, ne contengono un numero veramente molto grande. Infatti, sappiamo che la materia è composta di atomi in modo tale che, ad esempio, in un solo grammo di metano ci sono circa ventimila miliardi di miliardi di molecole e, particella più particella meno, lo stesso vale per un grammo di acqua. Allora si può far “finta” di avere infinite particelle, poiché non è più importante sapere ad ogni istante la posizione e la velocità di ognuna delle miriadi di particelle, e il sistema si può descrivere molto bene, quasi con “infinita” precisione, con un piccolo numero di variabili termodinamiche come la temperatura, la pressione e l'entropia. In altri termini, il limite termodinamico vuol dire che i dettagli microscopici del sistema possono essere trascurati e non c'è più la necessità di conoscere i dettagli del moto (posizione e velocità, ad ogni istante di tempo) delle singole particelle e delle loro mutue interazioni.

Cosa accade, poi, quando al limite termodinamico alcune osservabili termodinamiche del sistema, come l'energia (in termini più tecnici, la “funzione di partizione” del sistema) o le loro derivate matematiche, come il calore specifico, presentano una divergenza?

Un'analisi superficiale indicherebbe che abbiamo sbagliato la descrizione teorica del nostro sistema. In realtà la comparsa dell'infinito non indica un non-senso, ma la presenza di uno dei fenomeni fisici più importanti che si presenta per una miriade di sistemi, da quelli macroscopici a quelli del mondo subnucleare: il sistema presenta una "transizione di fase", cioè il passaggio a uno stato diverso, come avviene per l'acqua che passa dallo stato liquido a quello gassoso (vapore) o a quello solido (ghiaccio), per un metallo che si magnetizza, per un materiale che diventa superconduttivo oppure, nella fisica delle interazioni fondamentali, quando si rompe una simmetria e il bosone di Higgs cambia il mondo dando una massa alle particelle elementari.

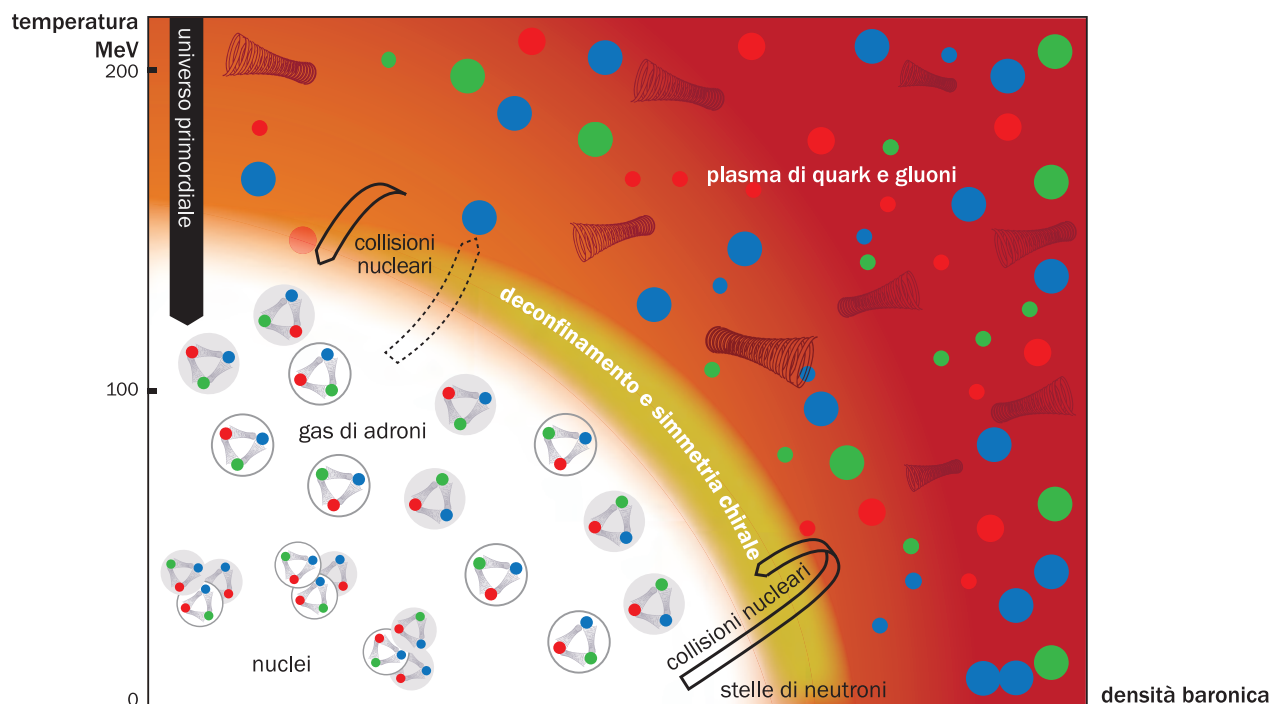
Non sempre però questo è stato così chiaro o è stato facile identificare che cosa ci sia dietro un infinito di questo tipo. Negli anni '50 si iniziò a scoprire che le particelle che interagiscono tramite la forza nucleare non sono solo i protoni e i neutroni nel nucleo, ma che esiste una vastità di particelle denominate "adroni". Anzi, si scopriva che più grande è la massa di tali adroni e più cresce il numero del tipo di particelle (la densità degli stati) che possono esistere. Più precisamente, questo numero cresce in modo esponenziale con la massa delle particelle. Appariva così che, quando un sistema di adroni veniva portato a una temperatura T prossima a 158 MeV (qualche migliaio di miliardi di gradi centigradi), l'energia del sistema sembrava crescere esponenzialmente fino a divergere. Queste

osservazioni portarono al concetto di temperatura limite (massima) "di Hagedorn", oltre la quale nessun sistema poteva andare. A quel tempo non era facile capire che la realtà era un'altra, anche se con le conoscenze di oggi sappiamo che era quasi sotto gli occhi. Infatti, Rolf Hagedorn pubblicò il suo lavoro nel 1965, solo un anno dopo il lavoro in cui Murray Gell-Mann e George Zweig avevano introdotto l'idea che gli adroni si possono descrivere come composti di quark (vd. in *Asimmetrie* n. 16 p. 18, ndr). Ma quasi nessuno credeva alla loro reale esistenza fino alla prima metà degli anni '70.

Nel 1975 Nicola Cabibbo e Giorgio Parisi intuirono che la divergenza presente nel gas adronico non era altro che il segnale della transizione di fase a un plasma di quark (vd. fig. b). Circa 35 anni dopo tale intuizione, il plasma di quark viene studiato, e siamo ragionevolmente certi che venga effettivamente creato, nelle collisioni in Lhc. Questo è, difatti, lo stato della materia che ha permeato l'universo nei primi microsecondi dopo il Big Bang (vd. in *Asimmetrie* n. 15 p. 20, ndr). La presenza dell'infinito nella teoria era il segnale dell'esistenza di particelle, i quark, fino ad allora sconosciute.

a.
Rolf Hagedorn, il fisico tedesco che diede il nome alla temperatura limite massima.





Altre volte l'infinito appare in maniera sostanzialmente diversa e segnala l'esistenza di fenomeni insospettati. Nella seconda metà dell'800, la ricerca sperimentale sull'emissione di energia elettromagnetica da parte di un corpo, in ragione della sua temperatura (detta "radiazione di corpo nero"), aveva condotto a stabilire due leggi fondamentali, quella di Stefan-Boltzmann (la potenza irradiata è proporzionale a T^4) e quella di Wien (la frequenza a cui c'è la massima emissione è proporzionale a T), e per un po' di tempo si fece finta di aver capito questo fenomeno fisico. Però i tentativi di dare una interpretazione teorica ai risultati sperimentali, ricorrendo alle leggi dell'elettromagnetismo e della termodinamica, portavano alla presenza di un infinito. John William Rayleigh e James Jeans ottennero per l'emissione termica una legge in cui la potenza emessa cresce indefinitamente all'aumentare della frequenza. A questo risultato fu dato successivamente il nome di "catastrofe ultravioletta", perché la divergenza riguardava le frequenze oltre il visibile. L'ipotesi dei quanti di Planck preveniva la comparsa di questa divergenza, fornendo il corretto spettro di emissione del corpo nero, ma era priva di qualsiasi giustificazione nell'ambito della fisica

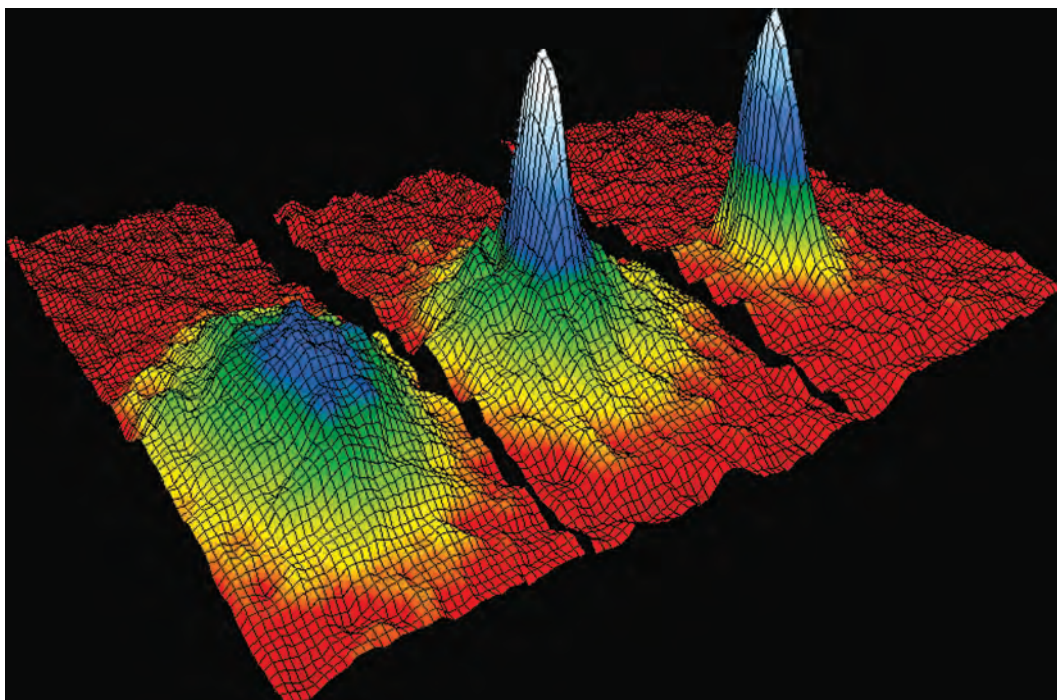
del tempo. Tuttavia, essa ha dato inizio alla fisica quantistica che ha completamente rivoluzionato il modo di vedere il funzionamento del mondo microscopico (vd. anche p. 40, ndr). Lo sviluppo della fisica quantistica ha permesso poi di capire che le particelle con spin intero, dette "bosoni", hanno una distribuzione in impulso, detta "di Bose-Einstein" (da cui il nome "bosoni"), che almeno a basse energie è molto diversa da quella classica di Boltzmann (vd. in Asimmetrie n. 19 p. 32, ndr). Tale distribuzione spiega bene molti fenomeni, ma quando il potenziale chimico è nullo, se si guarda a impulso zero, la distribuzione di Bose-Einstein diverge. Di nuovo, che cosa significa? La distribuzione è errata? In realtà, studiando più attentamente il problema, l'infinito nella distribuzione segnala un fenomeno di "condensazione di Bose-Einstein", ipotizzata da Einstein nel 1925, basandosi su un lavoro di Satyendranath Bose, che solo 70 anni dopo è stata realizzata da Eric Cornell e Carl Wieman all'Università del Colorado e da Wolfgang Ketterle al Mit, usando un gas di rubidio. Si tratta di un fenomeno che fa sì che, sotto una certa temperatura, in un gas di bosoni improvvisamente quasi tutti gli atomi condensano fermandosi a velocità nulla.

b.
Il grafico mostra come varia la densità barionica in funzione della temperatura. In un sistema composto da quark e gluoni in equilibrio, quando la temperatura supera il valore critico tra 150 e 170 MeV avviene una transizione di fase tra uno stato confinato (adroni) e uno deconfinato (plasma di quark e gluoni). Tale scenario, che si suppone sia avvenuto subito dopo il Big Bang, viene simulato con calcoli su reticolo (vd. in Asimmetrie n. 11 p. 25, ndr) ed è cercato dagli sperimentisti agli acceleratori con ioni pesanti come Alice al Cern.

c.

La formazione di un condensato di Bose-Einstein è stata dimostrata nel 1995 da Eric Allin Cornell e Carl Wieman e, indipendentemente da Wolfgang Ketterle, premiati con il premio Nobel nel 2001.

I tre grafici mostrano (al diminuire della temperatura, andando da sinistra a destra nella figura) la distribuzione di velocità di un gas di atomi di rubidio: a sinistra prima dell'apparizione del condensato, al centro si osserva la formazione del condensato, a destra solo atomi nello stato condensato.



Questo, tra le altre cose, permette di ottenere una materia a temperatura solo un decimilionesimo di grado più “calda” dello zero assoluto ($-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$): il sistema più freddo di tutto l'universo (basti pensare che lo spazio intergalattico ha una temperatura di -270°C). In questa fase gli atomi perdono la loro identità e si incontrano e si attraversano l'un l'altro, senza neppure deviare la loro traiettoria. Non possiamo soffermarci sulle proprietà e la forma di questo stato della materia superfluido, che sta dando vita a molteplici applicazioni non immaginabili fino a poco più di un decennio fa – come, solo per citarne una, gli orologi atomici ultraprecisi (vd. in *Asimmetrie* n. 17 p. 29,

ndr) – ma si tratta di un altro esempio di un infinito in fisica teorica, che ci porta a capire l'esistenza di un fenomeno spettacolare.

C'è infine un ultimo, anzi un primo, infinito termodinamico ancora presente in fisica teorica. Si trova nella teoria del Big Bang, che pone all'inizio il “Tutto” con temperatura e pressione infinita, che esplodendo ha dato l'inizio al tempo e all'universo in espansione che osserviamo oggi (vd. p. 21, ndr). Anche in questo caso la presenza di un infinito fa pensare che in realtà accada qualcosa di diverso che non abbiamo ancora capito. Certo trattandosi proprio dell'inizio del “Tutto” si tende a essere più “indulgenti”

con la presenza di un infinito, ma i fisici sono già al lavoro per trovare una teoria che lo spieghi. Come sempre, però, prima di trovare la soluzione giusta, tutto appare solo molto più complicato. Attualmente, le teorie che risolvono l'infinito termodinamico ne fanno apparire uno ancora più intrigante: l'infinito nel tempo, cioè l'eterno. Di fatti le possibili soluzioni teoriche, incuranti di S. Agostino, non contengono un inizio del tempo ma si estendono da un eterno passato a un eterno futuro. Insomma non è proprio facile sciogliere ogni infinito, ma la sua presenza è garanzia che dobbiamo ancora scoprire e capire qualcosa di veramente nuovo.

Biografia

Vincenzo Greco è professore associato di fisica delle interazioni fondamentali all'Università di Catania e coordinatore delle attività di fisica teorica presso i Laboratori Nazionali del Sud. Esperto di interazioni forti ad alta temperatura e densità, è stato *visiting professor* presso la Texas A&M University ed è tra i membri fondatori della Young Academy of Europe.

Link sul web

<http://cerncourier.com/cws/article/cern/28919>

http://www.colorado.edu/physics/2000/bec/what_is_it.html

<https://www.youtube.com/watch?v=Do4HGjmjobw>

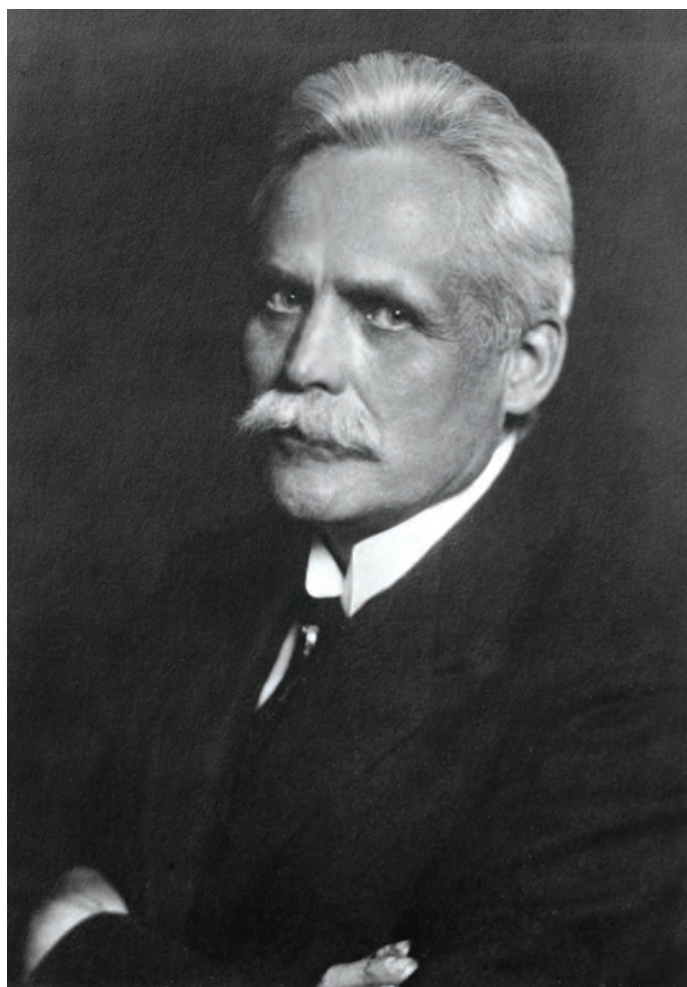
Una catastrofe evitata.

di Nadia Robotti

storica della fisica

a.

Il fisico tedesco Wilhelm Wien,
pioniere della teoria del corpo nero.



Il termine “catastrofe ultravioletta” fu introdotto dal fisico teorico austriaco Paul Ehrenfest nel 1911 per indicare il paradosso di “un’energia infinita” a cui portava la fisica classica nell’interpretare la legge di distribuzione dell’energia del cosiddetto “corpo nero”. Molto spesso si sostiene che all’idea dei quanti si sia giunti proprio partendo da questo “paradosso”, a cui avrebbe portato la legge classica di Rayleigh-Jeans. Ma è andata davvero così?

Tutta la storia inizia con alcuni risultati di Gustav Kirchhoff del 1859-60 sull’emissione e l’assorbimento di radiazioni da parte dei corpi, che mostravano che il rapporto tra il “potere emissivo” e il “potere assorbente” (rispettivamente, l’energia emessa e l’energia assorbita per unità di tempo a una data lunghezza d’onda λ e a una data temperatura T) è uguale per tutti i corpi scaldati alla stessa temperatura, indipendentemente dalla loro natura e dalla loro forma.

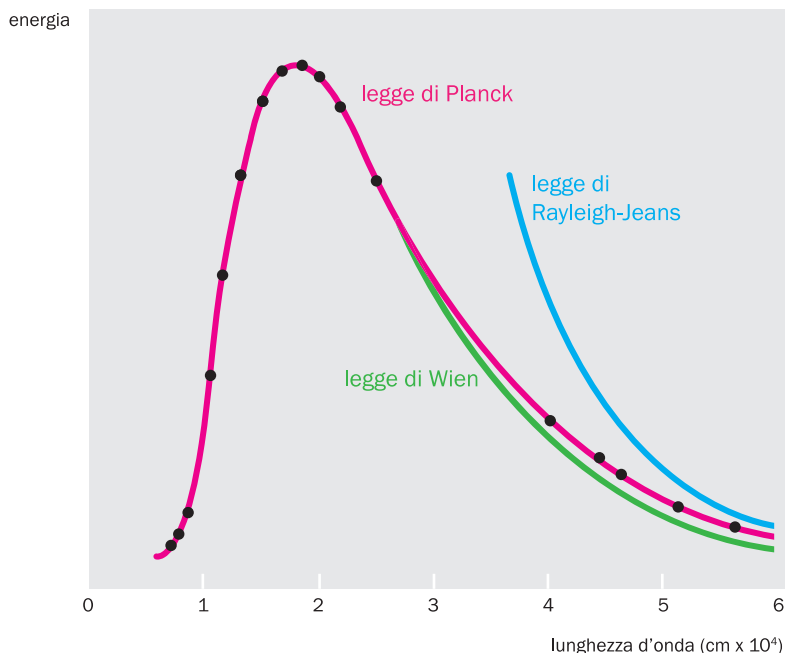
Questo rapporto rappresentava quindi una funzione universale. L’importanza di trovarne l’espressione fu immediatamente chiara. Per facilitare il problema, Kirchhoff introdusse il concetto di “corpo nero”, un corpo capace di assorbire tutte le radiazioni che riceve (quindi con potere assorbente pari a 1 per definizione). Di conseguenza, la funzione universale cercata, che indicheremo con $u(\lambda, T)$, coincideva proprio con il potere emissivo del corpo nero. Un contributo fondamentale alla determinazione di $u(\lambda, T)$ fu dato da Wilhelm Wien, il quale nel 1896 giunse per via termodinamica, sulla base di alcune ipotesi *ad hoc* sulla natura dei risonatori responsabili della radiazione, a una formula esplicita per la legge del corpo nero, che conteneva due costanti incognite. Questa legge rappresentava in quel momento la migliore approssimazione dei dati sperimentali disponibili.

Nel 1899 Max Planck si pose l’obiettivo di ottenerne una deduzione rigorosa. Il suo interesse derivava dal fatto che la legge del corpo nero rappresentava “qualcosa di assoluto” e per Planck “la ricerca dell’assoluto” era “la più alta delle attività scientifiche”. Planck partiva dal concetto di entropia, dandone una nuova definizione e applicandola al caso di un risonatore, e anche dall’idea che le due costanti presenti nella formula di Wien, “essendo la legge di distribuzione del corpo

nero, una funzione assoluta”, dovevano essere anch’esse “assolute” e dovevano essere contenute nell’espressione dell’entropia. Attraverso questa via Planck giungeva alla stessa legge di Wien, di cui però calcolava il valore delle due costanti: una di queste aveva proprio il valore di h , la futura costante di Planck, che faceva così il suo primo ingresso nella fisica. Pochi mesi dopo, Lummer e Pringsheim, e successivamente Rubens e Kurlbaum ottennero nuovi dati sperimentali, che mostravano una divergenza sistematica dalla legge di Wien per le lunghezze d’onda lunghe. Planck si rimise immediatamente al lavoro e, dopo “alcune settimane del più strenuo lavoro della (sua) vita” (siamo nel dicembre del 1900), giunse alla legge che porta ora il suo nome e in cui compaiono le due costanti assolute h e K (chiamata in seguito, su suggerimento di Planck, costante di Boltzmann). L’accordo con i dati sperimentali era perfetto. Alla base di questa derivazione, fondata sullo stesso procedimento della precedente, c’era l’ipotesi che l’energia di un risonatore di frequenza ν non variasse in modo continuo, ma in modo discreto, secondo multipli interi del “quanto di energia $h\nu$ ”. Il percorso di Planck, dunque, era completamente autonomo e libero da qualsiasi motivazione legata all’incapacità delle teorie classiche di trattare il problema del corpo nero. Sul problema dell’incompatibilità della legge di Wien con i dati sperimentali nella zona delle lunghezze d’onda lunghe, nel giugno del 1900, poco prima di questo intervento risolutivo di Planck, interveniva Lord Rayleigh, con un breve articolo, di cui Planck non era al corrente. Egli arrivava a un’espressione di

$u(\lambda, T)$ (chiamata poi legge di Rayleigh-Jeans), che era proporzionale a T e a λ^{-4} e che, fissata T , funzionava bene per le alte λ . Essa, tuttavia con il tendere di λ a zero, cresceva rapidamente all’infinito (vd. fig. b) e quindi implicava, contro l’evidenza sperimentale, che l’energia totale emessa dal corpo nero fosse infinita. Questa situazione è ciò che Ehrenfest nel 1911 chiamerà “catastrofe ultravioletta”. Rayleigh, tuttavia, non proponeva di estendere a piccole λ la legge di distribuzione in questa forma, ma introdusse un fattore di abbattimento della curva, uguale a quello introdotto da Wien con il risultato che la sua legge, per λ tendente a zero, non portava a nessuna “energia infinita”. Insomma, nel 1900 non c’era nessuna legge teorica a mostrare le difficoltà della fisica classica nel trattare il corpo nero e a spingere verso la ricerca di strade alternative. Sarà solo nel 1905 che Jeans pubblicizzerà la legge derivata da Rayleigh, correggendone un calcolo (da qui il nome di legge di Rayleigh-Jeans), ma rendendosi anche conto dei suoi limiti. Però siamo ormai nel 1905: la formula di Planck era ormai accettata e sull’ipotesi dei “quanti” i fisici, primo fra tutti Einstein, stavano cominciando a lavorare, discutendone i fondamenti e cercando di estenderla ad altri campi. In conclusione, se la catastrofe ultravioletta ha avuto un ruolo nella storia, ciò è avvenuto solo a posteriori, dopo l’introduzione dei quanti, nel senso che essa è servita e serve tuttora a giustificare l’abbandono della fisica classica, in favore di una nuova fisica vincente, quella che diventerà la nostra meccanica quantistica.

b.
La distribuzione di energia della radiazione di corpo nero in funzione della lunghezza d’onda, per una temperatura di 1600 K. Le curve rappresentano le leggi di Wien, Planck e Rayleigh-Jeans. Con i cerchietti sono indicati i dati sperimentali di Lummer e Pringsheim.



[as] selfie

Particelle in webcam.

di Leo4G

classe 4° G del Liceo Scientifico Leonardo Da Vinci di Firenze, a.s. 2014/15

a.

I ragazzi di Firenze e di Johannesburg (Sudafrica), vincitori della competizione "Beamline for schools" del 2015, e i loro docenti accompagnatori, assieme al direttore del Cern, Rolf Heuer, durante la visita al Cern.



Volete sapere come una classe di liceali si è ritrovata a lavorare per dieci giorni al Cern di Ginevra? Tutto è cominciato circa dieci mesi fa, quando la nostra insegnante di fisica, la prof.ssa Manuela Lima, è venuta a conoscenza dalla collega di filosofia Maria Mulas di un'iniziativa del Cern rivolta ai ragazzi delle scuole: si trattava della competizione "Beamline for schools" (Bf4s), un concorso su scala mondiale che viene organizzato dal 2014 per promuovere tra i giovani l'interesse e la curiosità per la ricerca scientifica nel campo della fisica. Per partecipare viene richiesto di ideare un esperimento da realizzare sulla linea di fascio dell'acceleratore di particelle nell'area T9 del laboratorio di Ginevra, accompagnato da un breve video di presentazione. Quando l'idea è stata presentata alla classe, non c'è stata alcuna esitazione: abbiamo deciso subito di partecipare, senza valutare cosa avrebbe comportato la nostra decisione, con l'ammirabile incoscienza che contraddistingue noi adolescenti. Per colmare

la quasi totale ignoranza riguardo alla fisica delle particelle, con grande entusiasmo abbiamo cominciato a lavorare durante alcuni incontri pomeridiani a scuola con la nostra professoressa di fisica e il tecnico del Lens (Laboratorio Europeo di Spettroscopie Non-lineari), Alessio Montori. Questi incontri di approfondimento, uniti a una visita all'acceleratore del Labec dell'Infn di Firenze, coordinata dal nostro professore Mirko Massi, e accompagnati da sessioni di lavoro online tramite i social network, ci hanno portato finalmente alla stesura del nostro progetto: "More than a webcam: a low cost particle detector", presentato con il nome di Leo4G. L'esperimento consiste nel testare e calibrare una comune webcam per utilizzarla come rivelatore di particelle: il nostro obiettivo era infatti quello di ottenere l'immagine del fascio di particelle utilizzando il sensore della webcam. Abbiamo infine deciso di girare il video di presentazione tra le strade di Firenze, riprendendo i punti fondamentali della nostra idea e

raccontandoli con simpatia e leggerezza. Inviato il progetto, non restava che aspettare la selezione.

Dopo intere settimane di “Prof abbiamo vinto?”, a cui seguiva un “Non sappiamo ancora nulla”, la risposta è arrivata il 1 giugno. Avevamo vinto! L’euforia è stata tanto coinvolgente che ancora facciamo fatica a smaltirla, nonché a credere che sia davvero successo: insieme a un gruppo di ragazzi di Johannesburg (anche loro vincitori del concorso) avremmo trascorso 10 giorni all’interno del più grande centro di ricerca nucleare del mondo! Dopo riunioni, test fallimentari e scambi di mail portati avanti per tutta l’estate, il 10 settembre siamo salpati alla conquista di Ginevra con una valigia piena di webcam di ricambio, per paura che il fascio potesse distruggerla, anche se possiamo fieramente dire che non è successo. Appena arrivati a Ginevra abbiamo subito incontrato le tre figure più importanti per la nostra permanenza al Cern: il coordinatore dell’intero progetto Markus Joos e i due scienziati Candan Dozen e Tim Brooks, che avrebbero aiutato nella realizzazione del progetto, rispettivamente, noi e i sudafricani. Ma chi sarebbe così folle da lanciare venti ragazzi tra i 16 e i 18 anni in un laboratorio dove si entra in contatto con materiali altamente costosi e potenzialmente pericolosi senza un’adeguata formazione? Sicuramente non il Cern. A questo proposito è stata dedicata infatti un’intera giornata, dove abbiamo assistito a lezioni teoriche sulla sicurezza informatica, sull’uso di sostanze criogeniche e sulle procedure in caso di incendio, seguite da simulazioni pratiche di situazioni di emergenza: essere scaraventati all’interno di una stanza in fiamme con due estintori a portata di mano rientra fra le prove. Dopo lezioni introduttive sul funzionamento dell’acceleratore e delle strumentazioni a esso collegate e dopo qualche visita alle diverse strutture del Cern, siamo finalmente entrati nell’area T9, pronti per iniziare il nostro esperimento.

L’attività è stata intensa e serrata: lavoravamo in turni di 3 ore dalle 9 alle 21 in gruppi formati da tre italiani e due sudafricani o viceversa. Il rapporto con i sudafricani è stato fin da subito d’intesa. Non c’è una grande differenza fra un adolescente di Firenze e uno di Johannesburg: entrambi hanno Facebook e Instagram e ascoltano la musica a volume alto. Per coloro che non erano impegnati nel turno erano state allestite due stanze per l’analisi dei dati acquisiti: le immagini catturate dalla webcam venivano inviate in queste stanze, dove si procedeva con la raccolta e l’elaborazione dei dati (conteggio delle particelle rivelate, misurazione dell’intensità dei pixel, rimozione del rumore di fondo). Procedendo nei giorni con le acquisizioni, i risultati non hanno tardato ad arrivare: già dal terzo giorno di test abbiamo cominciato a ottenere i primi dati interessanti, ovvero immagini dove era possibile riconoscere il passaggio delle particelle. Incredibile, ma vero: una webcam può essere utilizzata come rivelatore di particelle!

L’esperimento tuttavia non era finito, anzi è continuato ininterrottamente fino all’ultimo, modificando la posizione della webcam per ottenere diverse “foto” del fascio sia “di fronte” che “di profilo”: accumulare il maggior numero di dati ci avrebbe permesso di ottenere un risultato statistico più attendibile.

La convivenza per 10 giorni all’interno di un ambiente unico come quello del Cern con scienziati di ogni nazionalità non ha solo ampliato le nostre conoscenze nel campo della fisica, ma ci ha anche permesso di migliorare il nostro inglese, fondamentale per potersi relazionare con persone distanti da noi sia fisicamente che culturalmente.

Questa è la storia di come una classe qualunque di liceali si è ritrovata nel laboratorio di ricerca più importante al mondo e di come è riuscita a realizzare un progetto, partendo da un foglio bianco e una penna blu su un banco di scuola!



b.
I ragazzi durante l’analisi dei dati del loro esperimento.

[as] spazi

Una pinta di scienza.

di Francesca Scianitti



Nel 2012, due ricercatori all'Imperial College di Londra, Michael Motskin e Praveen Paul, ebbero un'idea semplice ma dal potenziale straordinario: creare un'occasione di incontro informale tra i malati di malattie diffuse e gravi, come il Parkinson, l'Alzheimer e la sclerosi multipla, con gli scienziati impegnati nella ricerca per la cura e il trattamento delle stesse patologie. L'evento prevedeva, in particolare, che gli scienziati aprissero le porte dei loro laboratori al pubblico, per mostrare le tecnologie e le metodologie di ricerca nel campo di loro competenza. Il successo fu inaspettato e motivò Motskin e Paul ad andare oltre. I due scienziati compresero subito che la modalità che avevano individuato per far incontrare la società civile e il mondo della ricerca, non solo poteva essere estesa ad altre discipline, ma poteva essere molto più efficace se ribaltata. Se l'apertura dei laboratori aveva avuto tanto successo, che impatto avrebbe avuto un incontro con gli scienziati in un luogo di svago e nello stile sciolto dell'aperitivo? È questa l'idea alla base di *Pint of Science*, un evento che dal 2013, anno della prima edizione, ha portato importanti scienziati nei locali di una cinquantina di città nel mondo, per un dialogo informale con gli amanti o i curiosi di scienza, nello stile diretto della conversazione davanti a una birra. Il successo è stato enorme e il terreno del confronto è stato subito esteso

a.
Dal 2013 l'iniziativa *Pint of Science* ha portato importanti scienziati nei locali di una cinquantina di città nel mondo, a dialogare con gli amanti e i curiosi di scienza davanti a una pinta di birra.



a tutti i settori scientifici senza limitazioni al campo delle curiosità. Oggi *Pint of Science* è in grado di mettere a confronto chiunque lo desideri con scienziati di grande livello, esperti di esplorazioni spaziali, cellule staminali, computer quantistici, materia oscura o demografia. L'obiettivo è sfatare miti e soddisfare curiosità, o anche approfondire conoscenze sparse o arrugginite, entrando in contatto con gli esperimenti più avanzati e con le scoperte scientifiche che, senza chiedere il permesso, stanno cambiando il nostro presente. L'Italia è entrata nella sfida nel 2015 condividendo in pieno il successo delle precedenti edizioni internazionali. "L'idea di portare *Pint of Science* in Italia è di Ilaria Zanardi, ricercatrice del Cnr e oggi presidente dell'associazione – Andrea Bersani, ricercatore della sezione genovese dell'Infn e vicepresidente dell'associazione *Pint of Science Italia* (www.pintofscience.it), racconta così la genesi dell'edizione italiana dell'evento e del *core team* di divulgatori volontari – Ilaria è entrata in contatto con gli ideatori dell'iniziativa in Inghilterra, dove si era trasferita per il periodo del dottorato. Tornata in Italia, si è rivolta innanzitutto ai colleghi ricercatori che con lei

collaboravano al blog di divulgazione scientifica *scientificast.it*. Tra questi c'ero anche io e, accolta l'idea con entusiasmo, ci siamo mossi subito per allargare il gruppo sul territorio nazionale, cercando referenti in altre città italiane. Si sono formati così i primi gruppi di coordinamento locale, che da subito hanno goduto di grande autonomia. Ne è nata una struttura, *Pint of Science Italia*, che in Italia si muove sotto la forma dell'associazione culturale, ma è parte del network internazionale". Sono una trentina, in aumento, i membri dei gruppi di coordinamento locale di *Pint of Science Italia*, che tengono viva l'iniziativa nelle singole città. E una decina i membri del *core team*, tra ricercatori di mestiere, ingegneri, scienziati di formazione, tutti appassionati di divulgazione, con la responsabilità della progettazione, comunicazione, piccole sponsorizzazioni, oltre naturalmente ai rapporti con l'organizzazione internazionale. "A livello statutario internazionale", spiega Andrea, "*Pint of Science* prevede che il ricercatore dedichi 30-45 minuti alla presentazione del tema della serata, riservando uno spazio al racconto della sua vita di scienziato, della sua

quotidianità. Questo per avvicinare il più possibile il pubblico alla realtà del mestiere che è, sì, straordinario ma è anche molto normale. In questo modo, le persone che ascoltano, i ragazzi in particolare, possono immedesimarsi più facilmente e vedere nel ricercatore una prospettiva di lavoro più accessibile di quanto non sia nell'immaginario comune". Nel 2015 l'edizione italiana ha avuto una straordinaria risonanza, anche oltre le aspettative: nei tre giorni dell'evento, 2400 persone hanno frequentato i 15 locali coinvolti a Genova, Milano, Pavia, Siena, Roma e Trento, dialogando con scienziati di fama internazionale su temi di neuroscienze, chimica, fisica, astronomia, biologia umana, scienze della terra, evoluzione, zoologia, tecnologie informatiche. Per il 2016 le date saranno il 23, 24 e 25 maggio, e il gruppo italiano si sta già organizzando per raddoppiare il numero delle grandi città coinvolte, allargando inoltre il campo alle piccole città vicine. Si aggiungeranno alle sedi della prima edizione, Arezzo, Torino, Napoli e Avellino, Palermo, Rovereto e Pisa. A chi abita o lavora in queste città, o avrà la fortuna di transitarvi nei tre giorni di *Pint of Science 2016*, è quindi il caso di augurare: "Salute e buona scienza!".

[as] traiettorie

Mosca express.

di Eleonora Cossi

a.
Dasha nell'atrio dell'Istituto di Ricerca Spaziale a Mosca, a fianco al modello di sonda Venera 3. La sonda avrebbe dovuto fare un atterraggio programmato su Venere il 1° marzo del 1966. Ma come spesso accadeva nell'epoca pionieristica delle esplorazioni spaziali, Venera 3 si schiantò sulla superficie del pianeta. Le resta comunque il record di primo oggetto costruito dall'uomo ad aver raggiunto la superficie di un altro pianeta.



Dasha Betsis è una giovane ricercatrice russa che si occupa di ricerca spaziale. Nel 2013 e 2014 ha lavorato per alcuni mesi a Catania in un gruppo di ricerca dei Laboratori Nazionali del Sud dell'Infn, occupandosi di rivelazione acustica di neutrini di altissima energia. Di questa esperienza ha portato nel suo Paese importanti competenze sviluppate sul campo e il calore umano della Sicilia.

[as]: Dove lavori oggi e qual è il focus delle tue attività di ricerca?

[Dasha]: Attualmente lavoro per l'Istituto di Ricerca Spaziale dell'Accademia delle Scienze Russa, nel dipartimento di fisica dei pianeti e del sistema solare a Mosca, dove mi sono laureata. Amo molto il mio lavoro, è veramente interessante! Al momento, io e il mio capo stiamo processando e analizzando dati che arrivano dallo spettrometro a infrarossi che si trova a bordo del Mars Express, il modulo spaziale dell'Agenzia Spaziale Europea (Esa), che è stato progettato e realizzato dal nostro istituto.

[as]: Sei sempre stata appassionata di scienza? Come hai scelto questa carriera?

[Dasha]: Sempre! È un compito stimolante trovare la risposta a domande del tipo “come funziona il nostro universo, la Terra o lo spazio?”. Come potrebbe essere noioso? Quando ero piccola sognavo di studiare o fare spedizioni nello spazio per scoprire i segreti degli altri pianeti. Per me sono molte le scienze interessanti: l'astrofisica, l'astronomia, la fisica, la chimica, la biologia, la medicina e anche lo studio della psicologia umana. Quindi, quando ho finito la scuola superiore, non sapevo cosa iniziare a studiare. Ma nonostante l'interesse per la scienza in generale, è sempre stato lo spazio la mia grande attrazione. E così ho deciso di iscrivermi alla facoltà di fisica.

[as]: Da un lontanissimo nord al cuore del Mar Mediterraneo alla ricerca dei neutrini. Cosa hai imparato nei laboratori siciliani?

[Dasha]: Anche se non mi occupo più di neutrini, ci sono molte cose che ho imparato a Catania e che sono importanti nel mio lavoro attuale. Per esempio, la mia esperienza con l'analisi dei dati e le tecniche di *digital signal processing*. Un'altra cosa importante è che ai Laboratori del Sud per la prima volta ho visto la vita degli scienziati e ho capito cosa voglia dire lavorare insieme a loro, fare parte di un gruppo di ricerca. Poi ovviamente mi sono fatta degli amici a Catania, che erano molto simpatici e calorosi!

[as]: Ti riconosci nello stereotipo del fisico geniale, un po' strambo e concentrato solo sulle sue ricerche?

[Dasha]: Credo di non assomigliare molto allo stereotipo serio, intelligente e “giusto” dello scienziato. Probabilmente queste sono persone che lavorano tutto il tempo e basta, geniali e un po' matte. Io sono più semplice. Certo io mi interessò di Marte, di spazio e neutrini, ma ci sono anche molte altre cose. Ad esempio adoro gli animali e ne ho ben sette: due procioni, quattro scoiattoli e un porcellino d'India! Passo molto tempo con loro e gli racconto del clima che c'è su Marte...

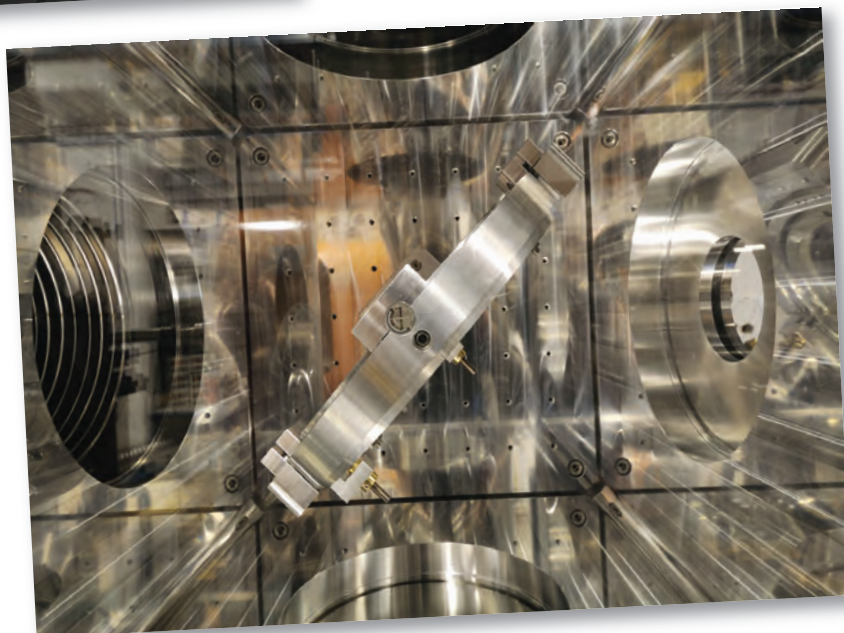
[as]

A spasso per i laboratori.

Pubblichiamo qui di seguito le foto vincitrici del Global Physics Photowalk 2015, il concorso fotografico organizzato dalla collaborazione Interactions (<http://www.interactions.org/cms/>), il network globale per la comunicazione della fisica delle particelle, che si è tenuto in otto tra i più importanti laboratori di fisica del mondo. Più di 200 fotografi dilettanti e professionisti sono andati a sbirciare dietro le quinte dei laboratori per immortalare la bellezza della fisica, inviando migliaia di foto per le rispettive competizioni locali, tra cui ogni laboratorio ne ha selezionato tre per la competizione internazionale.



a.
Foto di Katy Mackenzie che si è aggiudicata il primo posto della competizione internazionale. La *broker* di Vancouver ha fotografato la sala di controllo principale del laboratorio canadese per la fisica delle particelle Triumf, che per lei rappresenta un collegamento con le meraviglie dell'infanzia ed è associata al ricordo delle visite fatte al padre sul posto di lavoro, essendo egli andato in pensione dalla sua posizione di ricercatore senior più di 30 anni fa.



b.
Foto di Pietromassimo Pasqui che si è aggiudicata il primo posto della competizione italiana (e poi il secondo della competizione internazionale "popolare") ed è stata scattata nei Laboratori Nazionali di Frascati dell'Infn. La foto ritrae una camera del vuoto e uno specchio che trasporta il fascio laser dell'acceleratore Sparc.

Tutte le sei foto vincitrici della competizione internazionale (premio della giuria e premio "popolare") sono visionabili al link: <http://www.interactions.org/cms/?pid=1035363> e sul sito di Asimmetrie al link www.asimmetrie.it/index.php/as-illuminazioni-a-spasso-per-i-laboratori.

[as] illuminazioni

Sfide.

Che cosa hanno in comune le scelte politiche di Hillary Clinton, il suggerimento di Facebook di “taggarlo” un amico su una foto appena postata, la possibilità di osservare il leptone tau decadere in tre muoni e la scelta del ristorante per una cena romantica? Apparentemente nulla. Eppure sono tutti argomenti di sfide lanciate sul sito Kaggle (www.kaggle.com). Kaggle è una piattaforma web per l'analisi di dati e la produzione di modelli che descrivano dei dati.

Vediamo di che cosa si tratta. Pensate ai suggerimenti delle “partenze intelligenti”, che vengono dati in genere da tutti i telegiornali a ridosso delle vacanze. Su che cosa si basano? Su una semplice – e spesso errata – “analisi dei dati”, che parte dall'assunto che molti sono pigri e non riescono a organizzarsi per partire presto e molti altri preferiscono pranzare seduti comodi: quindi il suggerimento è di partire molto presto o durante l'ora di pranzo, per non trovare traffico. La realtà è spesso diversa e ci troviamo incolonnati insieme a migliaia di altre persone, anche se siamo partiti prestissimo. Perché? Perché l'analisi dei dati è una scienza complessa e l'intuizione può non bastare o darci addirittura indicazioni sbagliate. Negli ultimi decenni si è sviluppata la scienza del *data mining* e del *machine learning*, che potrebbe essere tradotto come “imparare dai dati attraverso l'uso del computer”. Molte sono le tecniche sviluppate e diversi gli

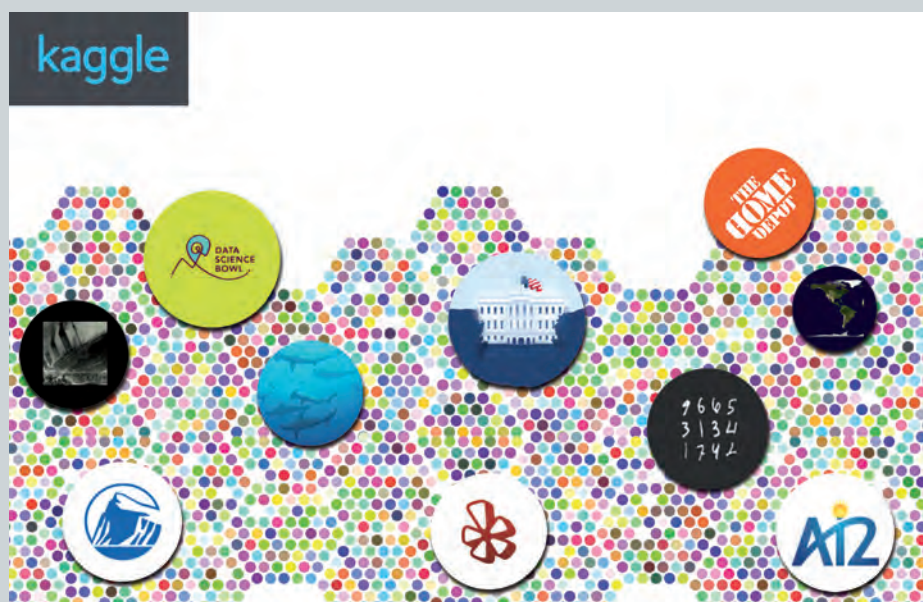
ambiti di applicazione, dallo sviluppo demografico alla fisica delle particelle, dalla medicina al traffico aereo.

L'idea di Kaggle si basa sul fatto che ci sono innumerevoli strategie che possono essere applicate a qualsiasi problema di analisi dati ed è impossibile conoscere a priori quale tecnica sarà più efficace. Le sfide proposte sul sito Kaggle funzionano così: chi è interessato a lanciare la sfida mette a disposizione i dati e una descrizione del problema da risolvere e decide per quanto tempo sarà aperta la sfida. I partecipanti (chiunque può farlo registrandosi sul sito) provano a risolvere il problema utilizzando la propria tecnica preferita e chi, alla fine, avrà trovato la soluzione migliore vince il premio (in denaro), messo a disposizione da chi ha lanciato la sfida. Il vantaggio per il promotore della sfida è il poter usare liberamente la soluzione vincitrice.

Il Cern ha già lanciato due sfide su Kaggle, una proposta dall'esperimento Atlas per migliorare l'analisi dei dati del bosone di Higgs (www.kaggle.com/c/higgs-boson, finita nel settembre 2014) e una proposta da Lhcb per la ricerca di un rarissimo decadimento del leptone tau (www.kaggle.com/c/flavours-of-physics, chiusa nell'ottobre 2015).

In una sezione apposita, <https://inclass.kaggle.com>, Kaggle ospita anche i progetti di centinaia di università di tutto il mondo, progetti in cui gli studenti possono cimentarsi liberamente nell'applicare le tecniche del *machine learning* a problemi reali.

Il Cern ha in programma di lanciare altre sfide, ma nel frattempo, la prossima volta che userete le indicazioni di un sito web per decidere in quale ristorante andare, sappiate che potrebbe essere che stiate utilizzando proprio il risultato di una sfida lanciata su Kaggle! [Barbara Sciascia]



Vedi anche la sfida sul sito:

- di Atlas: <https://higgsml.lal.in2p3.fr/>

- di Lhcb: <http://lhcb-public.web.cern.ch/lhcb-public/Welcome.html#Kaggle>

**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

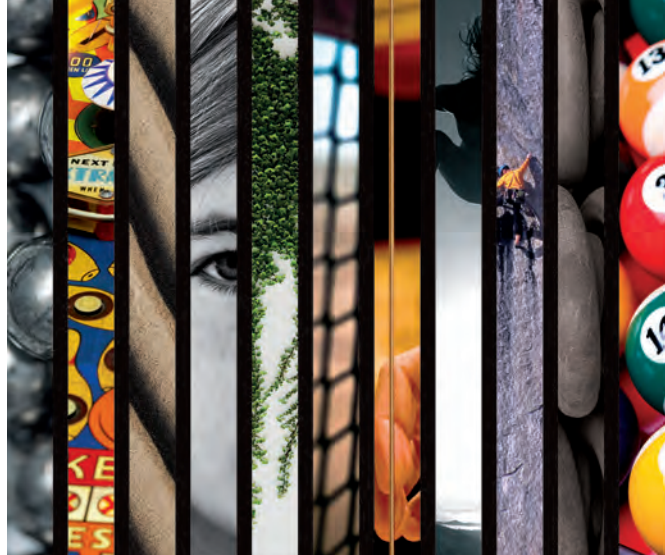
Laboratori Nazionali di Legnaro (Lnl)

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

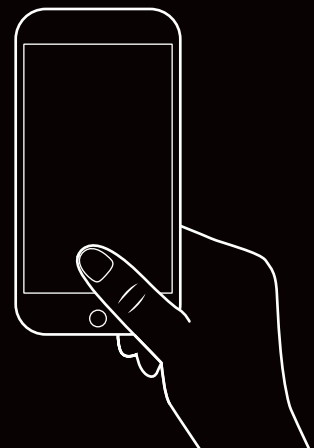
www.infn.it



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

Per **abbonarti gratuitamente** ad Asimmetrie vai su:
<http://www.asimmetrie.it/index.php/abbonamento>

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





www.infn.it

rivista online
www.asimmetrie.it