

[errori]

anno 12 numero **22** / 04.17

asimmetrie

rivista semestrale dell'Istituto
Nazionale di Fisica Nucleare



asimmetrie

Caro lettore,

La parola errore per un fisico ha un significato positivo, contrariamente a quello che può pensare chi confonde il concetto di errore con quello di sbaglio. Ogni misura, dalla temperatura dell'ambiente dove si svolge un esperimento, che si risolve nella lettura di un termometro, alla massa del bosone di Higgs, derivata da un complicatissimo processo di analisi di centinaia di milioni di eventi, deve avere un risultato accompagnato da un errore. Non esiste una misura di fisica senza errore - ancor più, non esiste una misura senza errore.

Se una teoria dice che il risultato di un esperimento deve essere 100 e io misuro 95, la teoria ne esce cancellata? Dipende... se l'errore della mia misura è 1, allora sì, perché 100 è distante 5 volte dal mio errore ed è quindi inverosimile che i due numeri vadano d'accordo, ma se il mio errore fosse 3, allora nulla potrei dire sull'eventuale disaccordo tra teoria ed esperimento. Tranne che stimolare i miei colleghi a inventare un esperimento che sia in grado di ridurre l'errore!

Quindi l'errore ha un significato positivo in fisica, è parte ineliminabile di un processo di misura, ma certamente con l'intelligenza e strumenti migliori può essere ridotto.

Gli sbagli no: se hai attaccato male un cavo e quello trasmette un segnale diverso da quello che ti aspetti, la misura verrà sbagliata e tu sarai convinto che è giusta, fino a che qualcun altro rifacendola con uno strumento diverso ti dimostrerà che avevi torto.

Grande morale e forza della scienza: prima di convincere il mondo che hai fatto una grande scoperta, devi aspettare che qualcun altro la confermi. Un bel metodo, quello della scienza - no?

Buona lettura.

Fernando Ferroni
presidente Infn



asimmetrie

Rivista dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

Semestrale, anno 12,
numero 22, aprile 2017

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

Francesca Cuicchio
(infografica)

hanno collaborato

Sonia Bergamasco, Federica Camilli,
Claudio Cassardo, Paolo Checchia,
Marco Delmastro, Luca Latronico,
Stefano Liberati, Paola Mamone,
Davide Meloni, Maria Gabriella Pulvirenti,
Michele Redi, Ettore Remiddi,
Gigi Rolandi, Lucia Votano

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

Tipolitografia Quatrini

stampa

Tipolitografia Quatrini

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 novembre 2016.
Tiratura 16.500 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 22 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 © Istockphoto.com (Zeremski)
// foto p. 4 © Istockphoto.com (RichVintage);
foto a p. 5 © francoisboudinot.wordpress.com;
foto b p. 6 © Pavol Stredansky; fig. c p. 7 ©
Asimmetrie-Infn; fig. p. 8 © Asimmetrie-Infn;
foto d p. 9 © Cern // foto a p. 10 Istockphoto.
com (Mammuth); fig. b p. 11 © Asimmetrie-
Infn; foto c, d pp. 12-13 © Fermilab // foto
a p. 14 © Cern; fig. p. 15 © Asimmetrie-Infn;
fig. b p. 16 © Asimmetrie-Infn // foto p. 17
© Los Alamos; fig. pp. 18, 19 © Asimmetrie-
Infn // foto a p. 20 © NASA/DOE/Fermi LAT
Collaboration, NRAO/AUI, JPL-Caltech, ROSAT;
fig. b p. 21 © Asimmetrie-Infn // foto a p.
22 © Cern; fig. b p. 23 © Opera; foto c p.
24 © Schiavon-INFN // fig. a p. 25 © NASA/
Johns Hopkins University Applied Physics
Laboratory/Carnegie Institution of Washington;
fig. b p. 26 © Massimo Ciaffrei-Asimmetrie-
Infn // fig. a p. 27 © Asimmetrie-Infn; fig. c
p. 29 © Asimmetrie-Infn; foto d p. 30 © AIP
Emilio Segrè Visual Archives, Margrethe Bohr
Collection // fig. p. 32 © Asimmetrie-Infn; foto
b p. 30 © Cern // foto a p. 34 © AIP Emilio
Segrè Visual Archives, Segrè Collection; fig.
1 p. 35 © Asimmetrie-Infn; foto c p. 36 ©
Kamioka Observatory, ICRR // foto a p. 37 ©
Giovanni Organtini // foto a p. 38 © Princeton
University Archives & Public Policy Papers
Collection // foto a p. 40 © Istockphoto.com
(Minerva Studio); fig. b p. 41 © wetterzentrale.
de // foto p. 42 © Marco Rossi; foto b p. 43 ©
Cern // foto a p. 44 © Cameranebbia; foto b
p. 45 © Cristina Chiappini design // foto p. 46
© Taxi1729 snc; foto a p. 47 © Paolo Siccardi
// fig. p. 48 © Barbara Sciascia.

Si ringrazia il Corriere della Sera per
l'autorizzazione alla riproduzione dell'articolo di
Sonia Bergamasco a p. 42.

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

Convivere con l'incertezza

di Gigi Rolandi

4

Misure al top

di Paolo Checchia

10

Per un pugno di sigma

di Marco Delmastro

14

Vite da neutroni

di Egidio Longo

17

Star Track

di Luca Latronico

20

Il fantasma dell'Opera

di Lucia Votano

22

Einstein al limite

di Stefano Liberati

25

Leggere tra le righe

di Ettore Remiddi

27

Eppur funziona

di Michele Redi

31

Bella e impossibile

di Davide Meloni

34

[as] selfieArduino *docet*.

37

di Federica Camilli, Paola Mamone,
Maria Gabriella Pulvirenti**[as] radici**

Errori di genio.

38

di Vincenzo Barone

[as] intersezioni

Che tempo che fa.

40

di Claudio Cassardo

[as] con altri occhi

Il gioco più bello del mondo.

42

di Sonia Bergamasco

[as] spazi

Uomo Virtuale.

44

di Vincenzo Napolano

[as] traiettorie

Mettersi in gioco.

46

di Catia Peduto

[as] illuminazioni

Testa o croce?

48

di Barbara Sciascia

Convivere con l'incertezza

L'arte di predire e misurare

di Gigi Rolandi





a.
La statua di Urbain Le Verrier
(1811-1877) a Parigi.

Intorno al 1850 l'astronomo francese Urban le Verrier confrontava misure precise al secondo dei tempi del passaggio di Mercurio davanti al Sole, fatte nei 150 anni precedenti, con quanto predetto dalla teoria di Newton. Trovò una differenza importante: la misura della precessione secolare del perielio (punto di massimo avvicinamento al Sole) dell'orbita era circa del 10% più grande di quanto predetto e le incertezze sulla predizione e sulle misure erano molto inferiori al 10%. Il confronto tra misure e predizioni teoriche, insieme alla corretta valutazione delle incertezze sperimentali e teoriche, indicò quindi, già nella seconda metà dell'800, la presenza di una nuova fisica, necessaria per descrivere correttamente il mondo naturale (vd. p. 25, ndr). Questa fu teorizzata solo nel 1915, grazie ad Albert Einstein e alla sua teoria della relatività generale, che estendeva la teoria di Newton e prediceva correttamente le piccole differenze dell'orbita nel caso estremo di un pianeta così vicino al Sole. Non c'è una regola generale per valutare l'incertezza su una predizione teorica. A volte il calcolo della predizione è così complesso che si riesce a svolgerlo solo in maniera approssimata e bisogna in questo caso valutare quantitativamente l'effetto delle approssimazioni fatte. Altre volte la predizione dipende da altre variabili note

sperimentalmente con una certa accuratezza: nel caso della precessione del perielio di Mercurio, la precisione della predizione dipendeva dalla massa di Venere, che era nota al tempo di Le Verrier con un'accuratezza superiore al 10%. In fondo, ce lo fece capire già Galileo: partendo da osservazioni sperimentali quantitative si può giungere a relazioni quantitative tra le variabili osservabili sperimentalmente (chiamate dai fisici semplicemente "osservabili"), cioè a modelli o teorie, che sono il cuore della comprensione del mondo naturale. La fisica progredisce così, paragonando tra loro osservazioni sperimentali quantitative e predizioni teoriche quantitative. In questo processo è fondamentale il concetto di incertezza delle misure e delle previsioni teoriche. L'incertezza è la stima della differenza tra il valore dell'osservabile misurata (o predetta) e il suo valore vero, cioè quel valore che potremmo idealmente misurare (o predire) solo con uno strumento o un metodo infinitamente preciso. Questa incertezza nel gergo dei fisici viene chiamata spesso "errore", ma questo, per l'accezione usuale del termine, in realtà è uno sbaglio! L'errore, così come lo intendiamo comunemente infatti, è qualcosa che si può correggere, mentre l'incertezza no. L'incertezza è parte centrale del processo di confronto. Misura e previsione sono in accordo quando la loro differenza è confrontabile con l'incertezza teorica o con quella sperimentale.

Ma come si valuta l'incertezza di una misura? È questa l'arte della fisica! Le incertezze sono di solito categorizzate in sistematiche e statistiche.

Le incertezze sistematiche includono le approssimazioni fatte nella definizione o nella realizzazione delle misure, i limiti degli strumenti utilizzati e l'imperfetta conoscenza dei parametri che intervengono nell'analisi dei dati. Il comitato congiunto per i manuali di metrologia ha prodotto un manuale (vd. link sul web, ndr), in cui le incertezze delle misure sono opportunamente classificate in varie categorie. Molte misure tipiche della vita comune sono limitate da incertezze sistematiche. Quando utilizziamo un metro comune per misurare una lunghezza, la precisione è limitata dallo strumento: la distanza tra le tacche che indicano i millimetri. La misura della velocità fatta con il tachimetro installato sulle automobili è realizzata in maniera approssimata, poiché si basa su una proporzionalità assunta tra la velocità di rotazione dell'albero di trasmissione e lo spazio percorso dal veicolo:

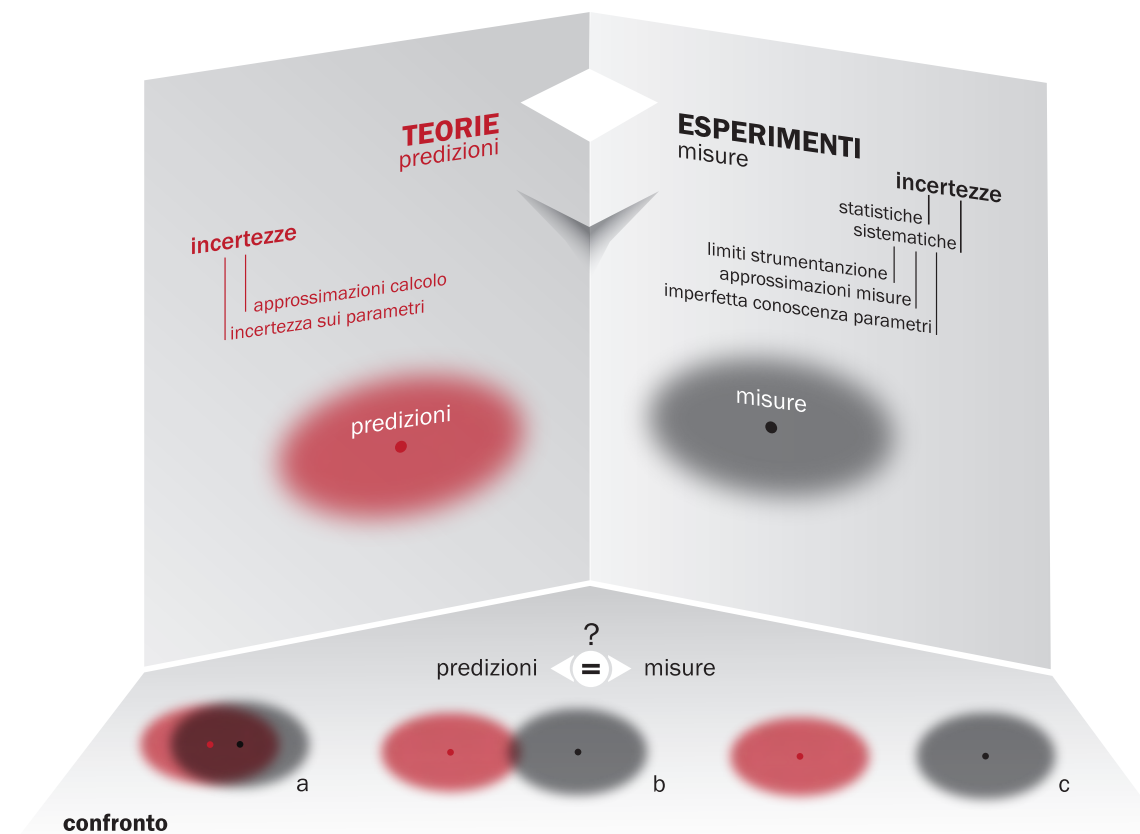
sgonfiando o gonfiando i pneumatici o semplicemente caricando molto o poco l'automobile possiamo variare questo fattore di proporzionalità. Quando invece ci pesiamo con la bilancia di casa, è la misura che è approssimata: il nostro peso cambia di giorno in giorno a causa di quello che mangiamo o dell'attività fisica che facciamo, e questa variazione è più grande della precisione dello strumento. In tal senso quindi il nostro peso è una misura non riproducibile.

Le incertezze statistiche sono invece le variazioni osservate in molte ripetizioni della stessa misura in condizioni apparentemente identiche. Alcuni fenomeni fisici hanno difatti una casualità intrinseca. L'incertezza statistica di una misura è legata al fatto che avendo ottenuto un certo risultato in un esperimento, rifacendolo si potrebbe ottenerne un altro. Un tipico esempio è il lancio ripetuto di dieci monete. Se al primo lancio si sono ottenute, per esempio, 5 teste e 5 croci, ripetendo il lancio non è detto che si ottenga lo stesso risultato, potrebbe invece uscire

3 volte testa e 7 croce, o 6 volte croce e 4 testa. Quanti tra i milioni di neutroni liberi all'interno di una "bottiglia" di confinamento (vd. p. 17, ndr) decadono in dieci minuti? Questo numero varia in maniera casuale: si può dimostrare che la scala tipica di questa variazione è inversamente proporzionale alla radice quadrata del numero di neutroni nella bottiglia. Per migliorare l'incertezza statistica di questa misura, si può aumentare il numero di neutroni o ripetere più volte la misura nelle stesse condizioni e fare una media tra i risultati. Il confronto tra i risultati delle singole misure, che ci si aspetta siano distribuite secondo una curva di Gauss (vd. p. 14, ndr), dà anche un'indicazione sulla riproducibilità delle misure stesse. Il confronto è una parte essenziale del progresso in fisica. Quando bisogna fare calcoli molto complessi e accurati per predire una osservabile, è importante che questi calcoli vengano fatti in parallelo e indipendentemente da più di un gruppo di fisici teorici, in modo che i risultati si possano confrontare oggettivamente.



b.
In un esperimento la precisione dello strumento di misura ha un'influenza sull'incertezza sistematica dello stesso.



c. Uno dei punti chiave del progresso della conoscenza scientifica è il continuo confronto tra teoria ed esperimento. Il maggiore o minore accordo tra i due fornisce informazioni importanti alla comprensione dell'universo in cui viviamo. Sia la predizione che la misura sono affette da incertezze: se indichiamo con un punto il valore centrale di entrambe, possiamo rappresentarne l'incertezza come una regione più o meno grande che contiene con una certa probabilità i risultati di ripetute predizioni o misure della stessa quantità. Se ora confrontiamo la predizione con la misura, possiamo avere tre situazioni diverse: a sinistra, le incertezze si sovrappongono ampiamente, per cui possiamo affermare che la predizione e la misura sono in accordo; a destra, non c'è sovrapposizione, per cui possiamo affermare che la misura e la predizione non sono in accordo; al centro vediamo che le due incertezze si toccano appena: in questo caso non possiamo trarre conclusioni e dobbiamo diminuire le incertezze sulle misure e/o sulle predizioni per poter arrivare a una conclusione.

E dalla loro compatibilità nasce la “confidenza” sull'accuratezza della predizione. Se le predizioni non sono compatibili, bisogna riguardare la logica del calcolo e trovare i motivi delle differenze. E lo stesso vale per i risultati sperimentali. Il Large Hadron Collider (Lhc) del Cern, ad esempio, è uno strumento unico che permette di esplorare per la prima volta condizioni in cui la materia collide ad altissima energia. Ci sono due collaborazioni, Atlas e Cms, che misurano le collisioni con apparati sperimentali diversi e le analizzano indipendentemente, fornendo un controllo incrociato dei risultati ottenuti.

Il confronto fa parte del processo scientifico, richiede tempo e permette di evitare gli errori umani, che sono sempre possibili sia nei calcoli sia nelle misure. Nell'autunno del 2011 la collaborazione Opera, analizzando i dati sui tempi di percorrenza dei neutrini dal Cern al laboratorio del Gran Sasso, era giunta alla conclusione che i neutrini viaggiavano a una velocità superiore a quella della luce (vd. p. 20, ndr). La reazione della comunità scientifica è stata di cercare velocemente un confronto sperimentale: la sequenza temporale con cui i neutrini venivano inviati dal Cern è stata modificata, per rendere più efficace la misura del tempo di percorrenza, e altri esperimenti al laboratorio del Gran Sasso si sono attrezzati per effettuare questa misura. Già alla fine della primavera del 2012 il problema era stato archiviato e il risultato sperimentale dei neutrini superluminali non è stato confermato, anche perché nel frattempo era stato identificato dalla collaborazione Opera un problema tecnico che causava l'apparente discrepanza tra misura e predizione: un errore nel

senso comune della parola, cioè uno sbaglio!

Il confronto tra due misure della stessa osservabile si basa sulle rispettive incertezze, che includono sia gli effetti sistematici, che possono essere ridotti tramite un controllo del metodo sperimentale, sia gli effetti statistici, che si possono ridurre ripetendo le misure o aumentando la sensibilità del metodo sperimentale. Le incertezze statistiche giocano talvolta brutti scherzi e per questo motivo la comunità scientifica ha deciso che una scoperta, per essere dichiarata tale, deve avere una significanza statistica di almeno cinque “deviazioni standard” o, come si dice in gergo, di cinque “sigma”. In pratica si valuta la compatibilità dei dati sperimentali sotto due ipotesi: l'assenza della scoperta, data l'esistenza dei fenomeni noti, e la presenza della scoperta, data l'esistenza dei medesimi fenomeni noti. Per dichiarare una scoperta si richiede che i dati siano compatibili con la seconda ipotesi (presenza della scoperta) e che la probabilità della prima ipotesi (assenza della scoperta), chiamata “*p-value*”, sia minore di una parte su 3,5 milioni. Cioè, che la probabilità che i soli fenomeni noti producano una distribuzione dei dati così estrema da mimare un fenomeno nuovo (la scoperta) sia minore di una parte su 3,5 milioni. Insomma, per avere la certezza di una scoperta si richiede che la discrepanza tra la misura e la predizione sia più grande di cinque volte la stima dell'incertezza sulla differenza tra misura e predizione. La quantità di dati analizzati gioca un ruolo molto importante: in presenza di una vera scoperta, il *p-value* diminuisce all'aumentare dei dati analizzati. Questa probabilità di una parte su 3,5 milioni può sembrare

La Divina casualità



Quale è la probabilità che una scimmia che batte a caso i tasti di una tastiera componga la prima terzina della Divina Commedia? È un numero piccolissimo: la scimmia dovrebbe azzeccare quell'unica combinazione su 10 alla 134 combinazioni possibili. 10 alla 134 è un numero enorme: un 1 seguito da 134 zeri! Per confronto, tutte le stelle dell'universo sono solo pari a un 1 seguito da 22 zeri! Gli scienziati si dicono (abbastanza) sicuri di una scoperta quando la probabilità che la scoperta stessa sia dovuta al caso e non a un nuovo fenomeno non noto fino a ora è più piccola di 1 su 3,5 milioni (le cinque sigma,

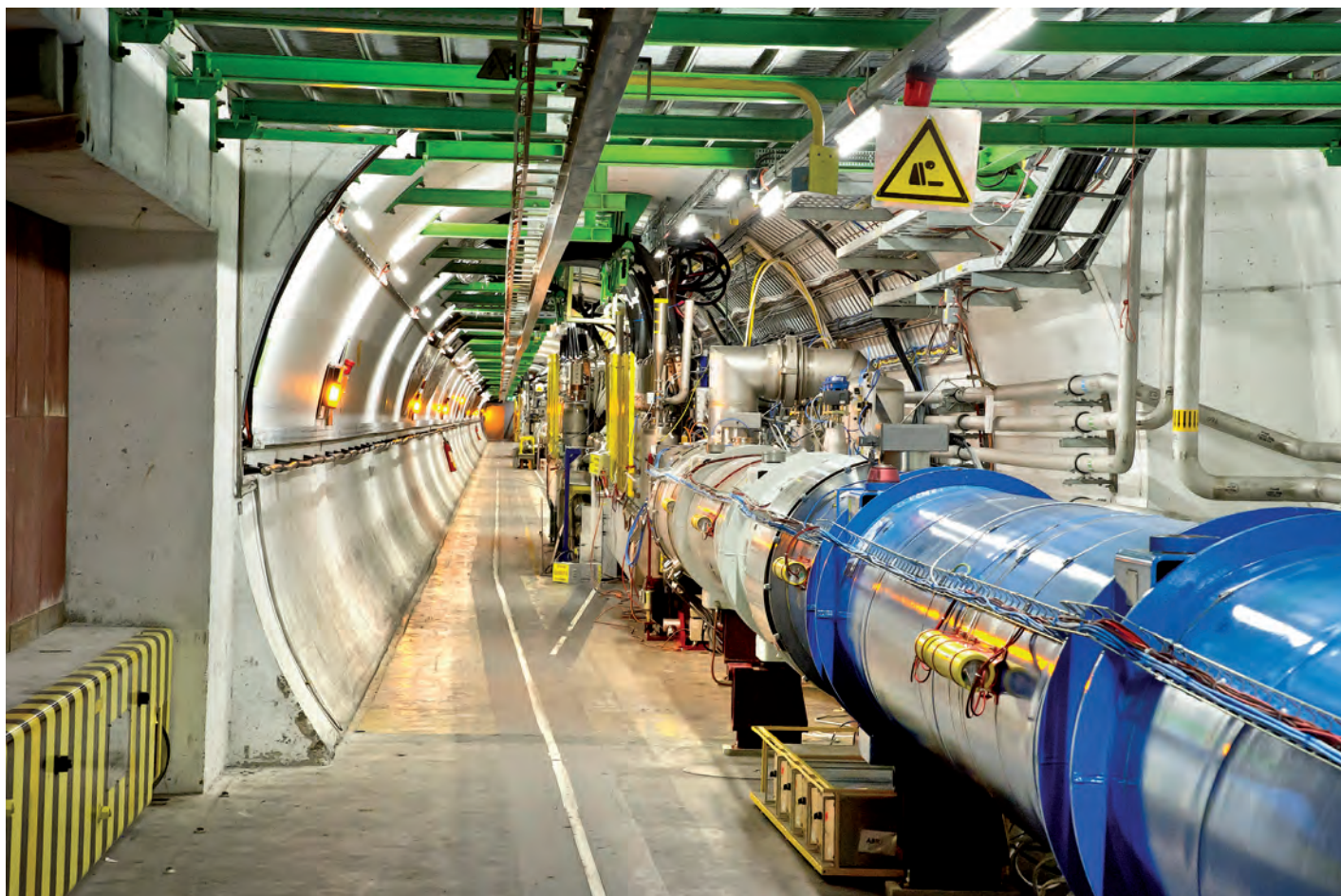
vd. anche in *Asimmetrie* n. 20 fig. c p. 32, ndr). Questa è la stessa probabilità che la scimmia scrivendo solo cinque lettere componga per caso (appena!) i primi cinque caratteri della Divina Commedia. Se però la scimmia compone una pagina da circa 400 caratteri, dobbiamo controllare se l'inizio della Divina Commedia appare per caso in questa pagina (è il famoso "look elsewhere effect", cioè il "guardare altrove", vd. p. 14, ndr). In questo caso la probabilità delle cinque sigma corrisponde alla probabilità di trovare in fila i primi 7 caratteri. [Barbara Sciascia]

molto piccola, ma bisogna tenere in conto che vengono effettuati molti esperimenti diversi e che ogni esperimento osserva molte distribuzioni diverse. Con una probabilità più alta, per esempio di quattro sigma, equivalente a una parte su 31.000, potremmo annunciare molte false scoperte. L'esperienza recente a Lhc ha mostrato l'importanza di questa convenzione. Nel dicembre 2011, Atlas e Cms hanno mostrato in un seminario al Cern i primi dati sulla ricerca del bosone di Higgs. Anche se molti scienziati presenti al seminario erano convinti che il bosone di Higgs fosse stato scoperto, l'analisi statistica mostrava un'evidenza minore di cinque sigma. Sono stati raccolti altri dati nel 2012, che hanno mostrato di nuovo lo stesso comportamento compatibile con la presenza del bosone di Higgs. Il *p-value* delle distribuzioni rilevanti è diminuito e l'analisi complessiva ha raggiunto un livello di confidenza tale da superare i cinque sigma e da rendere possibile l'annuncio della scoperta. Nel dicembre 2015, Atlas e Cms hanno mostrato, sempre in un seminario al Cern, i primi dati sul nuovo *run* di Lhc all'energia di 13 TeV. Questi dati mostravano un fenomeno inaspettato: gli eventi in cui erano stati prodotti due fotoni molto energetici e senza altre particelle intorno avevano una distribuzione diversa da quanto predetto dalla teoria. La distribuzione mostrava un

eccesso di eventi indicativo della possibile produzione di una nuova particella di massa 750 GeV, che decadeva appunto in due fotoni. Ma l'analisi statistica di questo fenomeno mostrava un'evidenza minore di cinque sigma. Sono stati raccolti altri dati nel 2016 che non hanno mostrato la stessa deviazione, e così il *p-value* della distribuzione incriminata è aumentato invece che diminuire, e l'entusiasmo di molti - insieme alle perplessità di molti altri - si è assopito. (vd. p. 14, ndr).

La conoscenza scientifica avanza quindi con un processo intrinsecamente scrupoloso. Occorre tempo per produrre e analizzare abbastanza dati in Lhc, per ridurre l'incertezza statistica sulle misure a un livello tale da poter dichiarare una scoperta. Occorre tempo per fare e confrontare calcoli complessi prodotti da gruppi teorici diversi e occorre tempo per fare nuovi esperimenti capaci di confermare una "scoperta", quando questa è stata fatta da un solo esperimento. Questo processo continuo di confronto, basato su calcoli e misure sperimentali e su una corretta valutazione delle loro incertezze è lento, ma è anche solido. La comunità scientifica vi è abituata: prima di accettare la scoperta di un nuovo fenomeno, sa che deve aspettare la sua evidenza statistica a cinque sigma e la conferma da più di un esperimento.

d.
Il tunnel di Lhc al Cern di Ginevra.



Questo tempo di avanzamento della conoscenza può essere molto lungo rispetto alla velocità con cui oggi viaggia l'informazione. Il grande pubblico è molto interessato ai risultati scientifici, e questo è un bene, ma bisogna sempre tenere presente che una scoperta, prima di essere accettata come tale dalla comunità scientifica, ha bisogno di confronti e di una corretta valutazione delle incertezze. E che questo processo richiede del tempo. Fare un titolo a effetto del tipo "Newton aveva torto", quando Le Verrier mostrava l'incompatibilità della misura dell'orbita di Mercurio con le previsioni della teoria di Newton o quando Einstein mostrava che la relatività generale spiegava questa incompatibilità, sarebbe stato uno sbaglio, perché Newton non aveva torto! La sua teoria viene utilizzata ancora oggi in moltissimi casi, quando l'incertezza della predizione dovuta al non utilizzo della relatività generale è piccola rispetto ad altre incertezze del caso in esame. Al contrario, sarebbe sbagliato usare oggi la teoria di Newton senza valutare, appunto, l'incertezza legata al non utilizzo della relatività generale. Le incertezze quindi - e non gli errori - fanno progredire la comprensione del mondo naturale. In tutti i sensi comuni di queste due parole.

Biografia

Gigi Rolandi è ricercatore al Cern e professore di fisica sperimentale delle alte energie alla Scuola Normale di Pisa. Il suo campo principale di ricerca è la fisica degli acceleratori e i test di precisione del modello standard. Ha partecipato agli esperimenti Aleph e Cms con responsabilità centrali nella costruzione dei tracciatori e nell'analisi dei dati. È membro degli *editorial board* di Physics Letters B e Jhep ed è membro dell'Accademia Pontaniana.

Link sul web

www.bipm.org/utls/common/documents/jcgm/JCGM_100_2008_E.pdf
https://it.wikipedia.org/wiki/Precessione_del_perielio_dell'orbita_di_Mercurio
<http://home.cern/topics/large-hadron-collider>
<https://atlas.web.cern.ch/Atlas/Collaboration/>
<http://cms.web.cern.ch>
https://en.wikipedia.org/wiki/Faster-than-light_neutrino_anomaly

DOI: 10.23801/asimmetrie.2017.22.1

Misure al top

Una storia di incertezze

di Paolo Checchia



Al concetto stesso di misura si deve accompagnare quello di incertezza (o errore) con cui il risultato della misura è ottenuto. Troppo spesso ci si scorda che il binomio risultato-incertezza costituisce uno dei fondamenti di qualsiasi risultato scientifico. La tanto declamata “certezza scientifica” è in realtà un processo delicato, in cui si valuta se un’affermazione (come ad esempio “esiste il bosone di Higgs”, ma anche “il fumo è dannoso alla salute”) è suffragata da risultati sperimentali, la cui incertezza è tanto piccola da rendere irragionevole l’affermazione opposta.

Nella fisica, e non solo, ci sono quantità che vanno misurate con la massima precisione (ovvero con il minor errore possibile) per tutta una serie di motivi, non ultimo per il fatto che una misura con un errore troppo grande non servirebbe a nulla. Se ad esempio il Gps ci desse la nostra posizione con un errore di un chilometro, è evidente che non ci sarebbe utile

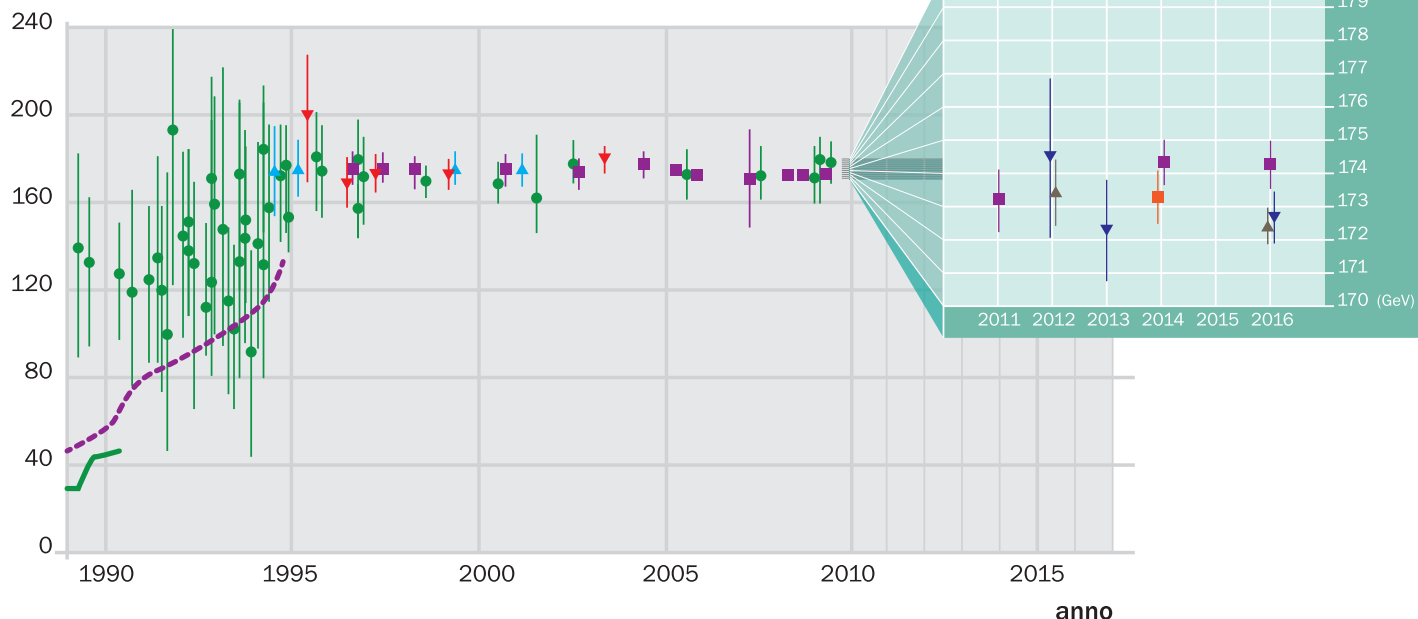
quando in automobile siamo alla ricerca della strada migliore. A volte è possibile ottenere misure indirette di una certa quantità in aggiunta a misure più dirette. Supponete di trovarvi in una valle in montagna e di voler sapere quanto distanti si trovano le pareti che la delimitano. Se emettete un grido e riuscite a distinguere l’eco, con un buon cronometro potete misurare il tempo intercorso tra grido ed eco e, conoscendo la velocità del suono, calcolare la distanza dalle pareti. Ovviamente questa misura (indiretta) non può essere molto precisa ma è senz’altro più immediata di una faticosa misurazione del terreno (misura diretta). In alcuni casi, poi, la misura diretta non è assolutamente realizzabile, e quella indiretta costituisce l’unica possibilità a disposizione: se vi chiedete a che distanza è avvenuto un lampo, potreste contare i secondi che vi separano dall’arrivo del tuono, ma non potreste mai recarvi nel punto in cui si è sviluppata la scarica.

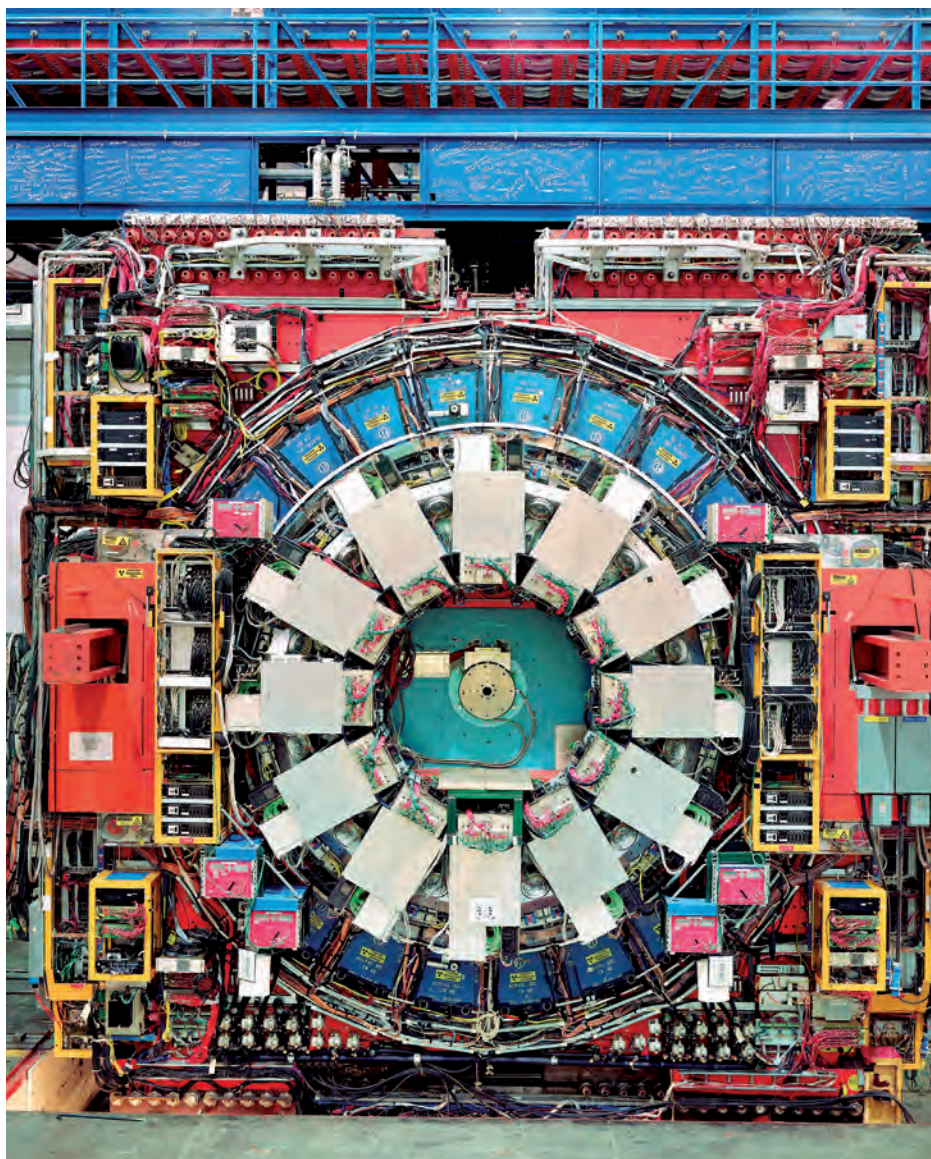
Entriamo ora nel mondo delle particelle elementari, occupandoci della particella più pesante di tutte: il quark top. A partire da quando è stata ipotizzata (alla fine degli anni '70), è stata sempre indicata come la più pesante tra i membri delle famiglie dei "fermioni", le particelle di spin semi-intero del "modello standard", la teoria che descrive il mondo delle particelle elementari. Ma quanto pesante? Prima di tutto si è stabilito che il quark top non poteva avere massa minore di circa la metà di quella dello Z, il bosone neutro scoperto assieme al bosone carico W da Carlo Rubbia. Nel collisore a elettroni e positroni del Cern, il Lep, si sono infatti prodotti milioni di Z e, se il quark top avesse avuto una massa sufficientemente bassa, una frazione degli Z prodotti sarebbe decaduta in una coppia formata dal top e dalla sua antiparticella, dotata della stessa massa, l'antiquark top. La mancata scoperta si è però trasformata comunque in un'informazione scientifica: un limite inferiore alla massa del quark. Non una vera misura, ma una limitazione alla nostra ignoranza, come si può vedere in fig. b, dove il limite è rappresentato dalla linea continua verde.

I risultati del Lep (e di altre macchine) hanno però prodotto anche una misura indiretta della massa del top. Il Lep ha misurato, con estrema precisione, alcune proprietà di altre particelle, come le masse dei bosoni Z e W, l'intensità della loro produzione, i loro modi di decadimento ecc. Quantità apparentemente indipendenti l'una dall'altra, ma che il modello standard è in grado di mettere in relazione tra loro. È cruciale notare che le varie relazioni dipendono dalla massa del quark top, per cui è possibile ottenere un valore della massa che metta d'accordo al meglio tutte le misure. Tanto più i risultati al Lep diventavano precisi (con errori sempre più piccoli), tanto più l'incertezza nella misura indiretta della massa del top calava, come si vede dai punti verdi e dalle loro barre d'errore nella fig. b. Supponendo valido il modello standard, la massa del top era già stata misurata (circa 160 GeV/c²) con un errore del 20% prima ancora che il quark venisse scoperto. Misure effettuate a un'energia più bassa di quella necessaria per produrre il quark top, hanno permesso di estrapolare la conoscenza in regioni di energia ancora non accessibili.

b.
Misure della massa del top in funzione dell'anno. La linea e i punti verdi sono i risultati del Lep, la linea e i punti viola i risultati combinati del Tevatron, con i risultati di Cdf (triangoli azzurri) e DZero (triangoli rossi), i triangoli marroni i risultati di Cms, i triangoli blu i risultati di Atlas mentre il quadrato arancione rappresenta la media mondiale nel 2014. In questi grafici, il simbolo viene posizionato sul valore più probabile, mentre le "barre d'errore", ovvero i segmenti sopra e sotto il simbolo, rappresentano l'incertezza sul risultato della misura.

massa top (GeV)





c.
L'esperimento Cdf del Fermilab di Chicago, che nel 1995 scoprì il quark top.

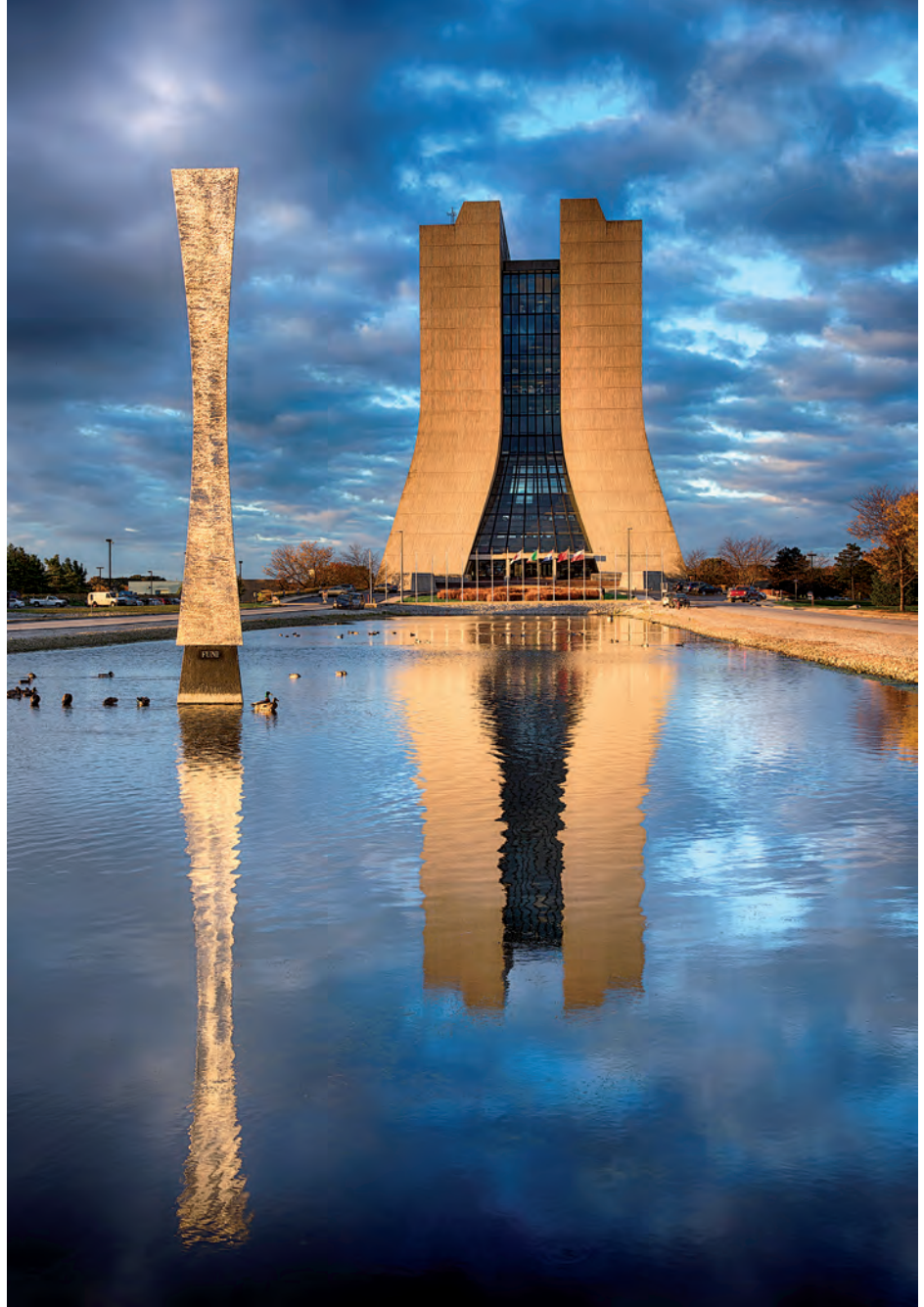
L'errore che si ottiene da una misura indiretta, che proviene da misure estremamente precise, ma che risente dell'incertezza di altri parametri previsti dalla teoria, non può però competere con quello di una misura diretta. La scoperta di una particella come il quark top praticamente coincide con una misura della sua massa: il top è altamente instabile in quanto, appena prodotto e ancora allo stato di quark "libero", decade in altre particelle. La misura diretta della sua massa si può ottenere solo con la misura di energia e direzione delle particelle prodotte dal suo decadimento. Supponendo di conoscere quali siano queste particelle e di poter osservare un certo numero di decadimenti, il segnale della presenza

del top viene osservato come un picco, la cui sommità coincide proprio con la massa e la cui larghezza dipende da un'altra caratteristica (l'instabilità) e dagli errori di misura. Osservare il segnale, quindi, vuol dire misurare la massa (vd. anche p. 14, ndr). Consideriamo ancora la fig. b: a partire da una certa data appaiono dei punti (i triangoli blu) con barre d'errore più piccole rispetto a quelle che corrispondono alle misure indirette. Questi punti provengono dai dati dell'esperimento Cdf del Tevatron al Fermilab (nei pressi di Chicago), che portarono alla scoperta del quark top con conseguente misura diretta della sua massa nel 1995. Si vedono apparire a breve distanza di tempo anche altri

punti (i triangoli rossi), che corrispondono al segnale prodotto dal top rivelato da un altro esperimento del Fermilab, l'esperimento DZero. Si vede anche che, con l'andar del tempo, le barre d'errore dapprima si riducono rapidamente, per poi rimanere abbastanza stabili, con un andamento che permette di capire l'incertezza della misura.

Al momento della scoperta, infatti, la massa della particella è misurata con un numero limitato di decadimenti: quelli sufficienti a dichiarare la scoperta, ma soggetti a grandi fluttuazioni dovute al numero statisticamente non molto significativo di dati raccolti. Queste fluttuazioni producono un'incertezza, che chiamiamo "errore statistico", che si riduce man mano che si accumulano dati. Va notato che l'errore statistico si riduce in funzione della radice quadrata del numero di decadimenti raccolti (quella della radice quadrata è una legge del tutto generale in statistica), per cui per dimezzarlo basterebbero quattro volte tanti dati, mentre per ridurlo a un terzo del valore iniziale servirebbe un campione nove volte più grande. L'errore statistico è, però, solo una delle componenti che determinano l'incertezza totale della misura,

d.
Scorcio del Fermilab, nei sobborghi
di Chicago (Usa).



rappresentata dalle barre d'errore: ve ne sono altre che, accumulando più dati, si riducono poco o nulla e che a lungo andare diventano dominanti. Queste componenti le chiamiamo “errori sistematici”. Ad esempio, i rivelatori che ricostruiscono l'energia delle particelle che provengono dal decadimento del top possono essere soggetti a errori di scala nella valutazione dell'energia, che si ripercuotono sul valore della massa misurata. Oppure ci possono essere errori nell'individuazione dei segnali di fondo che, inevitabilmente, si accompagnano al segnale. O anche incertezze teoriche sulla differenza tra la massa misurata in modo diretto e quella che risulta dalle misure indirette. In sintesi: un esperimento, con lo stesso tipo di misura, non riuscirebbe ad andare oltre una certa precisione nemmeno raccogliendo moltissimi dati. In fig. b appaiono punti (quadrati viola) con errori più piccoli di quelli finora considerati: si tratta delle combinazioni delle varie misure di entrambi gli esperimenti del Tevatron. Combinare misure diverse, specie se ottenute da collaborazioni diverse, serve a diminuire l'incertezza, sia per la riduzione dell'errore statistico che per la diminuzione di alcuni

effetti sistematici, qualora non fossero correlati tra gli esperimenti. L'avvento di Lhc, con il gran numero di decadimenti del top raccolti e la qualità dei rivelatori Atlas e Cms, ha permesso di migliorare ulteriormente la precisione con cui la massa del top è stata misurata:

come si vede dal cambio di scala in fig. b, ora le misure di Lhc permettono di dare la massa con un errore inferiore allo 0,3%. Siamo entrati nell'era delle misure di estrema precisione della massa del top con importanti implicazioni per alcuni modelli teorici.

Biografia

Paolo Checchia è un fisico sperimentale delle particelle elementari della sezione Infn di Padova. Ha partecipato a molti esperimenti al Cern, tra cui Delphi e Cms, per cui è stato responsabile del gruppo di Padova. Inoltre, come referente scientifico di progetti europei e nazionali per l'Infn nel campo della tomografia muonica, lavora all'applicazione della fisica delle particelle per usi civili.

Link sul web

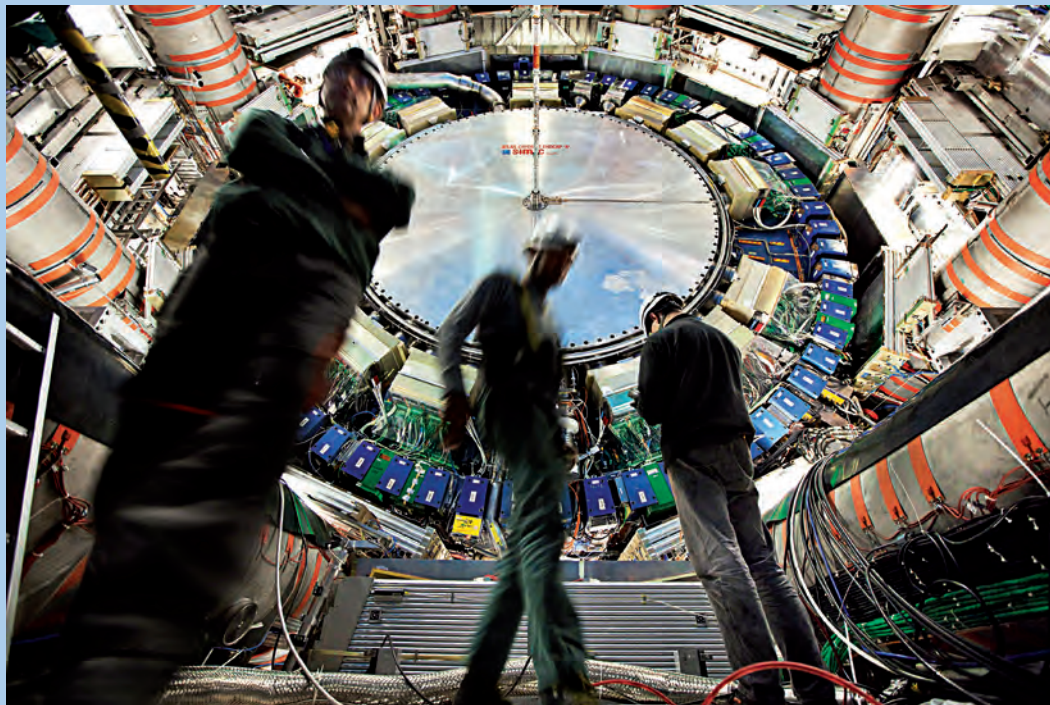
<http://www.treccani.it/enciclopedia/ricerca/errori-di-misura/>
<http://appuntidifisica.wikidot.com/l-errore-di-misura>
<https://press.cern/backgrounders/top-quark>
https://it.wikipedia.org/wiki/Quark_top

DOI: 10.23801/asimmetrie.2017.22.2

Per un pugno di sigma

Come distinguere tra fondo e segnale

di Marco Delmastro

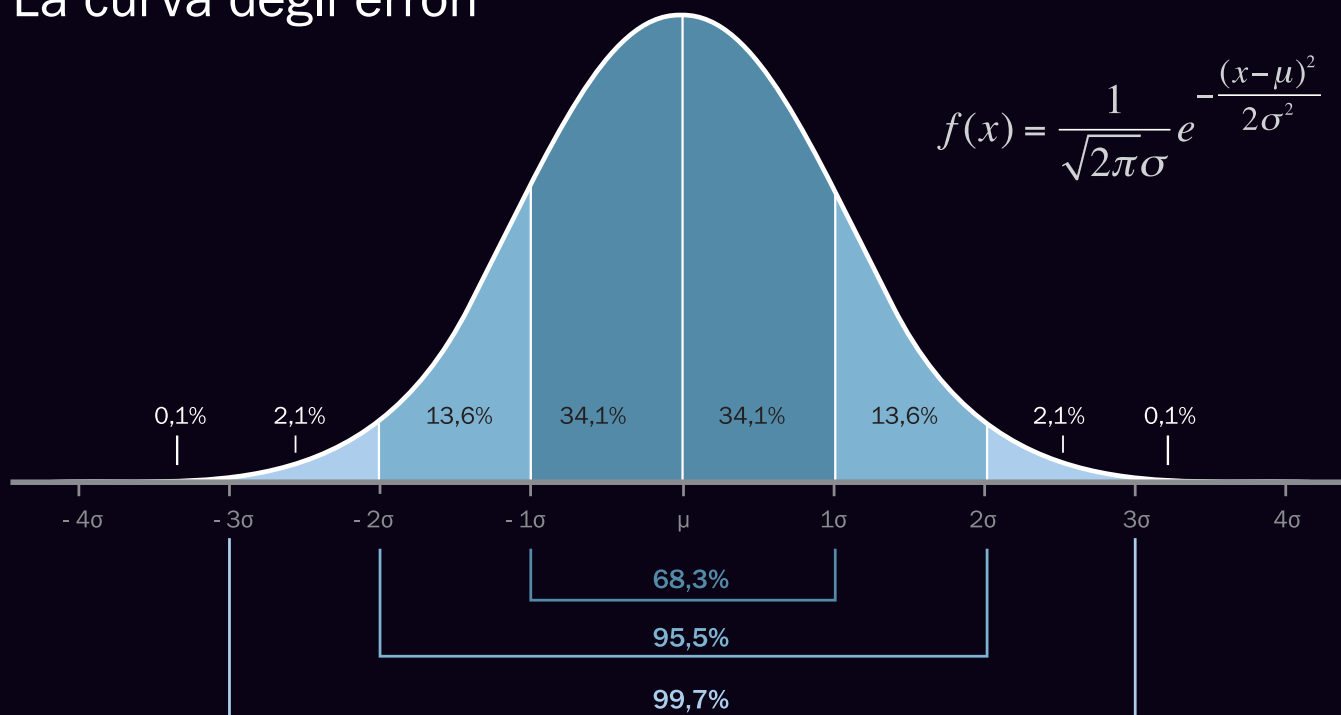


a.
L'esperimento Atlas di Lhc, che
assieme a Cms scoprì il bosone
di Higgs nel 2012.

I grandi esperimenti del Lhc sono alla ricerca di fenomeni molto rari. Prendiamo ad esempio il bosone di Higgs: la probabilità che ne venga prodotto uno in una delle collisioni tra due protoni in Lhc è circa una su dieci milioni. I fisici sanno calcolare queste probabilità, ma devono poi fare i conti con il fatto che sono, appunto, solo delle probabilità. Sapere che il bosone di Higgs viene prodotto in media ogni dieci milioni di collisioni di Lhc non significa che, raccolti e registrati i dati di dieci milioni di collisioni, tra questi ci sia davvero un bosone di Higgs. La presenza delle tracce di un bosone di Higgs in quei dati è l'evento più probabile, ma sono possibili anche scenari in cui ci siano tracce della produzione di due, tre o anche di nessun bosone di Higgs: sono meno probabili, ma non esclusi a priori. Quando si va a caccia di un fenomeno raro, è necessario poi sapere come si manifesterà nel proprio rivelatore. Nel caso della ricerca di una nuova particella instabile, come lo è per esempio il bosone di Higgs, bisogna tenere conto di come si disintegrerà. Serve dunque preoccuparsi non solo di quanto sia probabile che la nuova particella venga prodotta in una collisione, ma anche di quale sia la probabilità che, una volta prodotta, decada proprio nel modo che è stato deciso di osservare. Se il fenomeno di cui si è alla ricerca, per raro che sia, fosse

l'unico modo che la natura ha di produrre un certo segnale nel rivelatore, per scoprirlo servirebbe soltanto essere pazienti. Se, per produrre delle coppie di fotoni in una collisione tra due protoni, la natura avesse creato soltanto il bosone di Higgs, la sua scoperta sarebbe stata molto più semplice. Sebbene il bosone di Higgs si disintegri in due fotoni in media solo due volte su mille, sarebbe bastato aspettare: la prima manifestazione di una coppia di fotoni nei rivelatori avrebbe fatto urlare alla scoperta! La natura conosce però modi alternativi per produrre una coppia di fotoni, modi che niente hanno a che fare con la nascita e morte del bosone di Higgs. "Rumore di fondo" è il nome che i fisici danno a questi processi, che hanno l'apparenza dei fenomeni nuovi di cui sono a caccia, ma che con questi fenomeni non hanno nulla a che fare. Come già il "segnale" (ad esempio, la produzione di un bosone di Higgs che si disintegra in due fotoni), anche il rumore di fondo (nel nostro caso, la produzione diretta di due fotoni) è un fenomeno governato da leggi statistiche. Anche per il rumore di fondo è dunque possibile sapere quanto sia probabile, in media, che si manifesti. Come già per il segnale, però, resta aperta la possibilità che anche il rumore di fondo si manifesti con frequenza maggiore o minore della media. E bisogna fare i conti con questa possibilità.

La curva degli errori



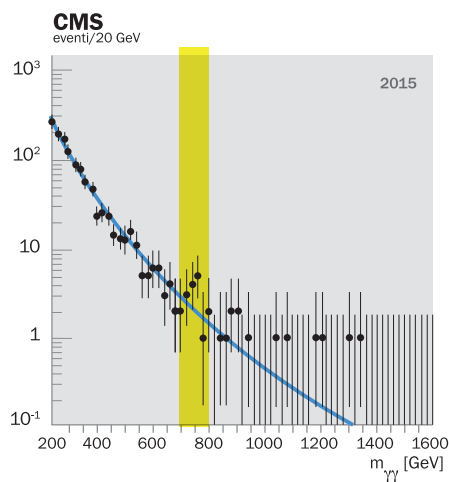
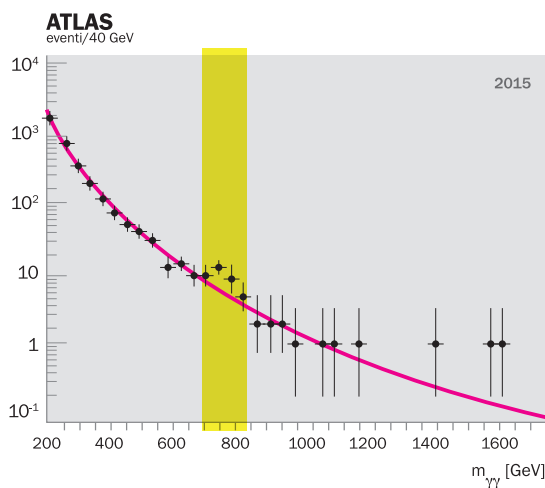
La figura riproduce la distribuzione di Gauss (o “gaussiana”), detta anche distribuzione normale degli errori, perché rappresenta la distribuzione di probabilità tipica degli errori di misura. La distribuzione è simmetrica rispetto al parametro μ , che ne rappresenta il valor medio (e può essere considerato il “valore vero” della quantità da misurare) e ha una caratteristica forma a campana, la cui larghezza dipende da un secondo parametro, σ , che prende il nome di “deviazione standard” e che dà una stima dell’errore tipico di una misura.

La probabilità che una singola misura cada in un certo intervallo dell’asse delle x è data dall’area sottesa dalla curva in quel dato intervallo. In figura sono rappresentate le probabilità che una misura cada negli intervalli compresi tra μ e $\mu+\sigma$, tra $\mu+\sigma$ e $\mu+2\sigma$, e così via fino a 4σ . Poiché la curva è simmetrica, la probabilità che una misura cada in un intervallo di $\pm\sigma$, $\pm 2\sigma$, $\pm 3\sigma$ ecc. intorno a μ è del 68,3%, 95,5%, 99,7% ecc. La probabilità che una misura cada a destra di 5σ , considerato il limite convenzionale di una scoperta, è di una parte su 3,5 milioni. [Egidio Longo]

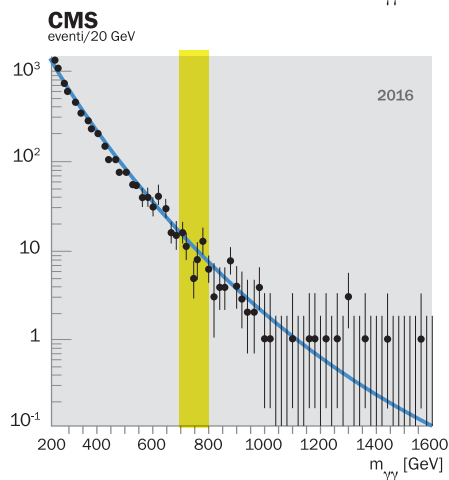
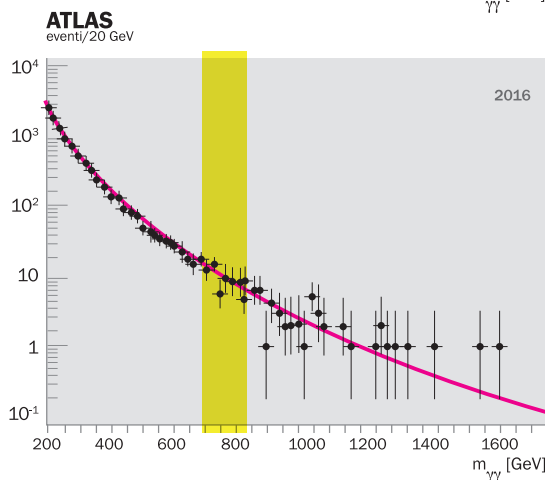
La presenza di un nuovo fenomeno nei dati di Lhc dovrebbe manifestarsi come un eccesso di eventi, eccesso rispetto alla quantità media di eventi di quel genere che ci si aspetterebbe, se in natura esistesse solo il rumore di fondo. Osservare un eccesso non è però la garanzia della scoperta di un fenomeno nuovo. È infatti necessario stabilire se l’eccesso sia realmente associato alla presenza di un segnale che si sovrappone al rumore di fondo o se, invece, i dati contengano solo il rumore di fondo, ma ci si trovi in una di queste situazioni meno probabili, in cui è stato prodotto più rumore di fondo di quanto uno si aspetterebbe in media. I fisici analizzano dunque i dati e calcolano la probabilità che un eccesso osservato sia più compatibile con l’ipotesi che esista solo il rumore di fondo, rispetto all’ipotesi che al rumore di fondo si sia sovrapposto il segnale. Più questa probabilità è piccola, maggiore è la sicurezza con cui si può affermare di aver osservato un fenomeno nuovo. Valori grandi di questa probabilità fanno invece pensare a una fluttuazione statistica del rumore di fondo. I fisici hanno stabilito dei valori convenzionali per queste probabilità, misurati in un’unità legata alla larghezza “sigma” della curva a campana di Gauss (la cosiddetta “gaussiana”, vd. approfondimento). Tre sigma rappresentano una probabilità sufficientemente piccola da permettere di

annunciare l’osservazione di un fenomeno di interesse, cinque sigma una talmente piccola da dichiarare una scoperta (come è avvenuto nel 2012 per il bosone di Higgs).

Nel dicembre del 2015, in occasione della presentazione dei primi risultati ottenuti con i dati di Lhc raccolti all’energia nel centro di massa di 13 TeV, il mondo della fisica delle particelle è stato scosso dall’annuncio di un eccesso apparentemente molto intrigante, osservato nella ricerca di nuove particelle che, come il bosone di Higgs, si disintegrerebbero in coppie di fotoni. Sia Atlas che Cms, due dei quattro esperimenti che operano a Lhc, avevano osservato un eccesso di coppie di fotoni rispetto quelle attese dal solo rumore di fondo, coppie di fotoni che sembravano provenire dalla disintegrazione di una particella circa sei volte più pesante del bosone di Higgs. In entrambi i casi, la probabilità che l’eccesso fosse compatibile con il solo fondo era piuttosto bassa. Inoltre, lo stesso fenomeno sembrava manifestarsi in maniera indipendente in entrambi gli esperimenti. La faccenda, ovviamente, era più complessa di così. E infatti in quell’occasione i fisici di Atlas e Cms invitarono alla cautela. La statistica è una signora permalosa ed esigente. Nel caso specifico, non sarebbe stato corretto fidarsi solo della probabilità “locale”, associata al solo valore della massa della



b.
Nei dati del 2015 (i due grafici di sopra), sia in Atlas che in Cms c'era un eccesso di eventi inatteso nella regione segnata in giallo. Tale eccesso di eventi è sparito in entrambi gli esperimenti nei dati del 2016 (in basso).



presunta nuova particella. Quando si cercano fenomeni nuovi in molte direzioni diverse, bisogna, infatti, tenere conto del vasto spettro di ipotesi possibili. Immaginate di lanciare un dado a sei facce per cinque volte consecutive: la probabilità di ottenere il sei per dieci volte di seguito è piccola, circa una su ottomila. Se faceste una scommessa, vi riterreste piuttosto fortunati di vincerla. Immaginate invece di lanciare per cinque volte di fila mille dadi. La probabilità che, almeno per uno di questi mille dadi, esca il sei per cinque volte di fila è molto maggiore, e l'evento vi stupirebbe dunque molto di meno. Quando si calcola la probabilità delle osservazioni di Lhc, è necessario tenere conto del fatto che la ricerca non si limita a un solo fenomeno specifico, ma che cercare in tutte le direzioni corrisponde a lanciare moltissimi dadi di rumore di fondo, e che la probabilità che in almeno una di queste ricerche il fondo possa fluttuare e generare un eccesso che assomigli a un segnale è maggiore. Le probabilità "locali" vanno dunque corrette tenendo conto di questo aspetto, chiamato in gergo l'effetto del "guardare altrove" (vd. approfondimento a p. 8, ndr). Nel caso dell'eccesso della fine del 2015, le probabilità "globali" di una fluttuazione del fondo, corrette per l'effetto del "guardare altrove", salivano a valori molto poco eccitanti. Quando nell'estate del 2016 Atlas e Cms presentarono l'analisi dei nuovi dati raccolti durante la primavera scorsa, l'eccesso osservato alla fine del 2015 era sparito nei dati di entrambi

gli esperimenti. La prudenza delle prime analisi, una volta considerato l'effetto del "guardare altrove", era stata dunque certamente necessaria! La natura probabilistica dei fenomeni microscopici studiati in Lhc richiede cautela e pazienza. Nel frattempo, la comunità dei fisici teorici si era già cimentata nell'inventare nuove teorie che spiegassero l'inattesa presunta nuova particella. Tra la fine del 2015 e l'estate del 2016, più di quattrocento articoli hanno proposto la loro interpretazione dell'eccesso, nell'ipotesi che si trattasse del segnale genuino di un fenomeno nuovo. Ci si potrebbe chiedere se l'esercizio sia servito a qualcosa, ma questa è un'altra storia.

Biografia

Marco Delmastro è ricercatore per il Cnrs francese e lavora all'esperimento Atlas al Cern. È nato e cresciuto a Torino, dove si è laureato in fisica. Ha conseguito il dottorato all'Università di Milano. Dal 2005 lavora tra la Francia e la Svizzera, spendendo buona parte del tempo al Cern.

Link sul web

<http://www.borborigmi.org/2011/12/09/distinguere-un-segnale-da-un-rumore-di-fondo-prima-puntata-lanciare-i-dadi/>

DOI: 10.23801/asimmetrie.2017.22.3

Vite da neutroni

È il metodo che fa la differenza?

di Egidio Longo

Ci sono settori di ricerca in cui i fisici si dedicano con grandissimo impegno al perfezionamento della misura di una singola grandezza, ritenuta evidentemente fondamentale, attraverso una continua e metodica riduzione degli errori sperimentali. A volte con risultati sorprendenti, come nel caso della vita media del neutrone.

Il neutrone, insieme al protone e all'elettrone, è uno dei tre costituenti fondamentali di tutta la materia visibile dell'universo. È quindi evidente che una conoscenza accurata delle sue proprietà è essenziale per verificare le teorie con le quali cerchiamo di interpretare la natura che ci circonda. A differenza del protone e dell'elettrone, che hanno una carica elettrica rispettivamente positiva e negativa, il neutrone è elettricamente neutro e questo complica di molto l'investigazione delle altre sue proprietà. Non è infatti possibile manipolarlo con campi elettrici e magnetici, che sono utilizzati normalmente per accelerare le particelle, per trattenerle su orbite circolari, per selezionarle in impulso, ecc. Inoltre quasi tutti i rivelatori di particelle si basano su effetti legati alla loro carica elettrica e non possono essere utilizzati per rivelare direttamente il passaggio di un neutrone. Questo è il motivo per cui il neutrone è stato scoperto per ultimo, dal fisico inglese James Chadwick, solo agli inizi degli anni '30. Il neutrone ha un'altra proprietà, che lo distingue dagli altri due costituenti fondamentali della materia: non è una particella stabile, in quanto decade per interazione debole in un protone, un elettrone e un antineutrino, con una vita media di oltre 10 minuti, molto lunga rispetto a tutte le altre particelle elementari instabili, ma ben poca cosa rispetto all'età dell'universo. Può apparire dunque sorprendente, ma è così: uno dei costituenti fondamentali della materia ha una vita media incomparabilmente più breve dell'età dell'universo! Bisogna però considerare che il decadimento

del neutrone è reso possibile dal fatto che la sua massa è leggermente maggiore della somma delle masse di protone, elettrone e antineutrino. All'interno di un nucleo, invece, si deve considerare anche l'energia di legame, che è negativa e produce quindi un "difetto di massa" in base all'equivalenza tra massa ed energia prevista dalla relatività: i nuclei stabili sono più leggeri della somma dei loro componenti, cancellando quindi il piccolo eccesso di massa del neutrone libero che ne consente il decadimento.

In questo contesto, una misura precisa della vita media del neutrone libero rappresenta una verifica molto stringente delle nostre conoscenze sui primi minuti di vita dell'universo dopo il Big Bang.

a.
James Chadwick (a sinistra), a cui si deve la scoperta del neutrone negli anni '30, ritratto assieme al Generale Maggiore Leslie R. Groves, Jr., direttore del Progetto Manhattan.



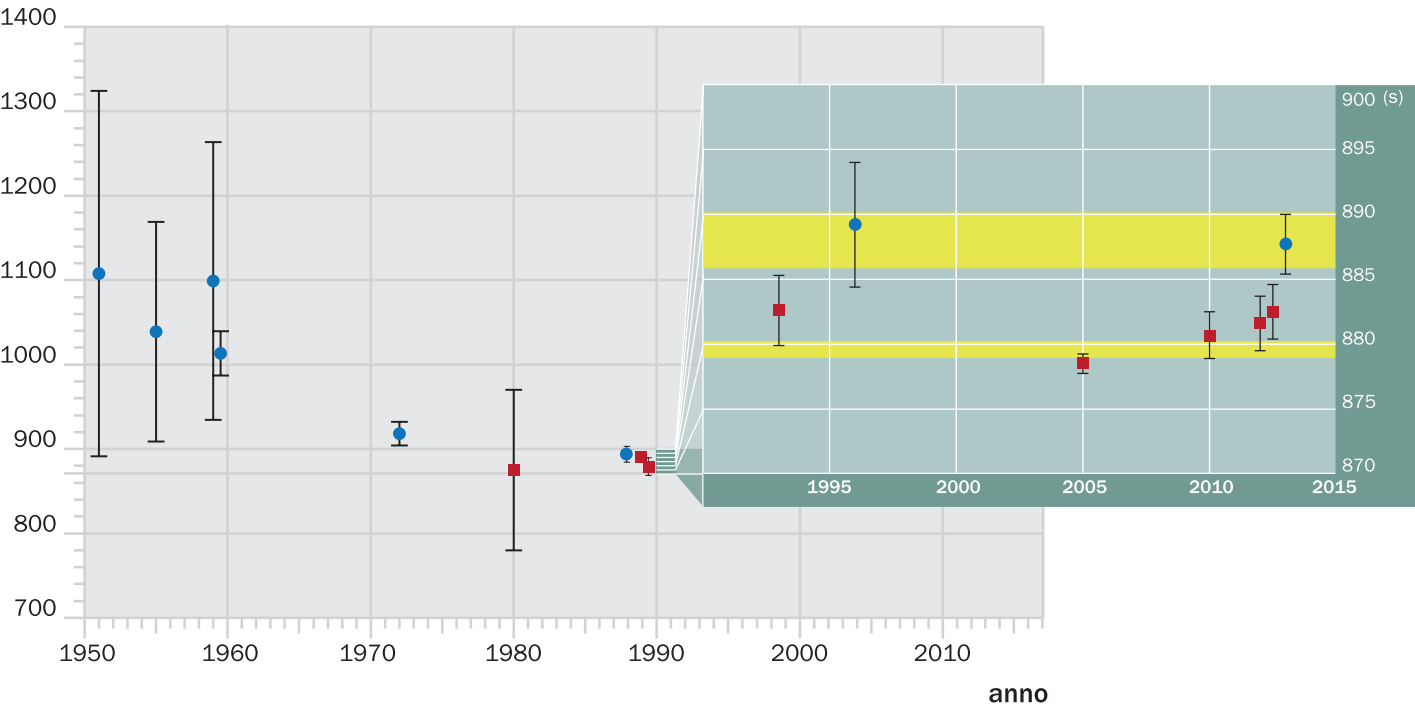
Un secondo dopo il Big Bang, l'universo è costituito da un plasma di protoni, neutroni, elettroni e neutrini in equilibrio termico e continuamente rimescolati tra di loro dall'interazione debole. Dopo questo tempo, la temperatura scende al di sotto di questo equilibrio, congelandone le frazioni relative. A questo punto, i neutroni cominciano quindi a decadere, finché, dopo circa 100 secondi, l'ulteriore raffreddamento permette la combinazione di protoni e neutroni per la formazione dei nuclei degli elementi più leggeri (l'idrogeno, il deuterio, l'elio e il litio). Questa nucleosintesi primordiale si conclude dopo qualche minuto. La vita media del neutrone, dunque, confrontabile con questo intervallo di tempo, determina in maniera rilevante l'abbondanza primordiale di questi elementi. Le abbondanze relative predette da questo modello di nucleosintesi possono essere confrontate con quelle osservabili nel cosmo ai nostri giorni e presentano un ottimo accordo, che costituisce una delle più precise verifiche sperimentali dell'ipotesi del Big Bang. Attualmente, l'errore più importante su questa predizione dipende proprio dalla precisione con cui si conosce la vita media del neutrone.

Se diamo un'occhiata alla fig. b, che riporta i valori misurati

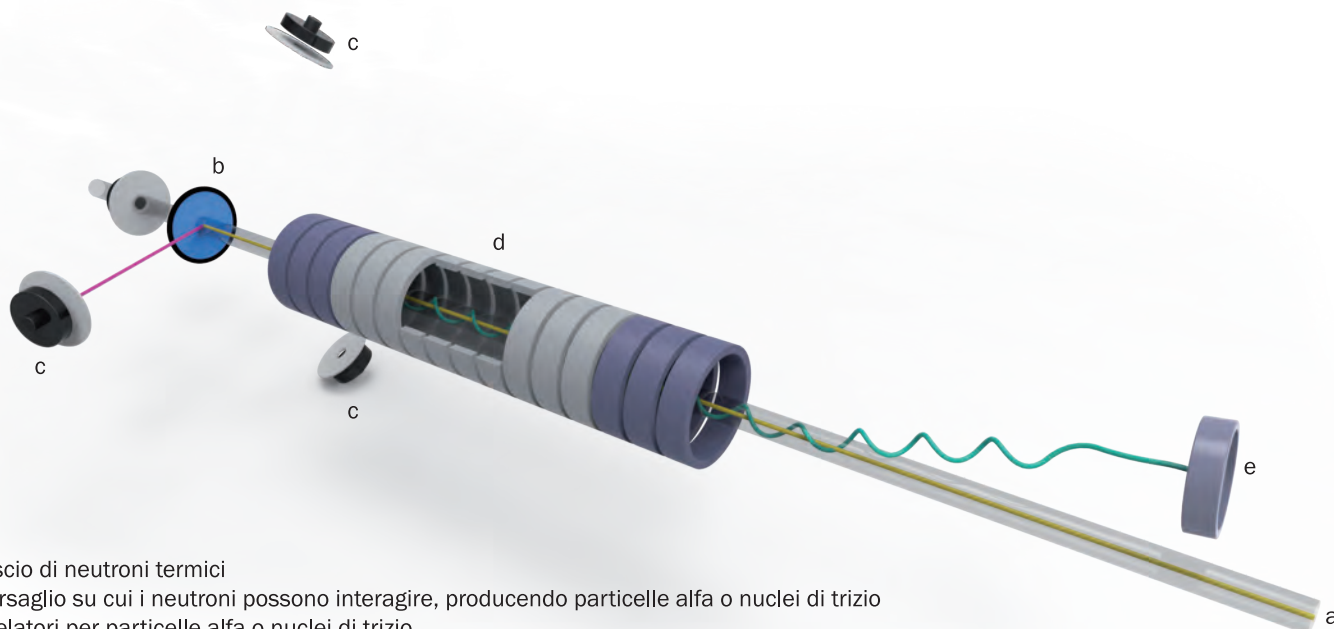
della vita media del neutrone in funzione dell'anno in cui sono state effettuate le misure, osserviamo prima di tutto che le misure iniziano solo negli anni '50, venti anni dopo la scoperta del neutrone. Queste prime misure, che utilizzano fasci di neutroni lenti ("termici") prodotti nei primi reattori nucleari, si basano sul conteggio dei loro decadimenti in volo, osservati con la rivelazione in coincidenza dei prodotti visibili del decadimento, il protone e l'elettrone. Questo numero viene confrontato con il numero di neutroni del fascio. Il rapporto misurato dipende però da molti parametri sperimentali (tra cui la probabilità di rivelazione dei prodotti di decadimento) e questa è l'origine delle grandi incertezze di queste misure, dell'ordine del 20%.

Un notevole progresso si ha in un esperimento pubblicato nel 1972, nel quale l'efficienza di rivelazione degli elettroni di decadimento raggiunge praticamente il 100%, riducendo drasticamente una delle maggiori fonti di incertezza (in seguito si preferirà misurare con alta efficienza il numero di protoni, vd. fig. c). Come si vede nella fig. b, non solo l'errore è molto più piccolo dei precedenti, ma il valore misurato di 918 secondi si colloca al limite inferiore degli intervalli di errore degli esperimenti precedenti, che pure erano in accordo

vita media
del neutrone (s)



b.
Misure della vita media del neutrone in funzione dell'anno. I cerchi blu sono le misure in volo, i quadrati rossi le misure in bottiglia. Nell'inserito sono visibili le misure successive al 1990: le due bande gialle rappresentano le bande di incertezza a un sigma per le medie delle misure in volo (in alto) e in bottiglia (in basso).



- a. fascio di neutroni termici
- b. bersaglio su cui i neutroni possono interagire, producendo particelle alfa o nuclei di trizio
- c. rivelatori per particelle alfa o nuclei di trizio
- d. trappola per protoni
- e. rivelatore per protoni

tra di loro, con valori che si collocavano abbondantemente sopra i 1000 secondi. Nel 1980 viene realizzata una misura con una tecnica sostanzialmente diversa, nella quale si utilizzano neutroni ultrafreddi, con una energia cinetica che corrisponde a una temperatura minore di 1 mK. In queste condizioni, con opportuni materiali è possibile realizzare pareti che risultano totalmente riflettenti per i neutroni: si possono quindi realizzare vere e proprie bottiglie, nelle quali i neutroni possono essere immagazzinati per centinaia di secondi, prima che le inevitabili perdite divengano significative. In queste condizioni, due misure successive del numero di neutroni contenuti nella bottiglia permettono in linea di principio di determinarne la vita media.

Dal 1980 al 2004 le due categorie di misure ("in volo" e "in bottiglia") danno risultati via via più precisi e in buon accordo tra loro, tanto che il Particle Data Group (Pdg) pubblica nella Review of Particle Physics del 2004 un valor medio di $885,7 \pm 0,8s$, che soddisfa gli stringenti test statistici per la combinazione di misure diverse. Nello stesso anno, tuttavia, viene annunciato un nuovo risultato in bottiglia estremamente preciso, ma che risulta 5 sigma inferiore rispetto al più basso degli altri valori. Nell'edizione del 2010 il Pdg scarta questo risultato con il criterio che è troppo lontano dagli altri, ma quasi contemporaneamente un nuovo risultato ottenuto con il confinamento magnetico, una variante del confinamento in

bottiglia, conferma un valore inferiore. Inoltre, una successiva rianalisi di un altro degli esperimenti in bottiglia riporta anche questo risultato a un valore più basso.

L'insieme delle misure più precise effettuate con i due metodi è riportato nell'insero della fig. b: come si vede, le due famiglie di misure sembrano addensarsi intorno a valori significativamente diversi. Ci sono errori sistematici non presi in considerazione nelle due tipologie di misura, o c'è invece qualche proprietà fisica, al momento imprevedibile, che rende diverse una misura in bottiglia e una in volo? Nuovi e più precisi esperimenti sono in preparazione con entrambi i metodi e ci si aspetta in particolare che l'imbottigliamento magnetico, meno soggetto degli altri a errori sistematici, possa gettare nuova luce su questo intrigante dilemma.

c. Schema di un esperimento in volo. Il fascio di neutroni termici entra da destra (a). La linea gialla rappresenta la traiettoria di un neutrone che raggiunge il bersaglio (b), producendovi una particella alfa (linea rosa) che viene poi rivelata in uno dei contatori (c). In questo modo si può determinare il flusso di neutroni entranti. Alcuni di essi decadono in un protone, un elettrone e un neutrino. I protoni prodotti vengono intrappolati nel cilindro (d) da un campo elettrico e imbottigliati da un campo magnetico. Quando si vuole contare il numero di neutroni decaduti, si arresta il flusso dei neutroni e si apre uno dei due lati della trappola elettrica: i protoni (linea verde) seguono delle eliche intorno alle linee di forza del campo magnetico, che li guidano verso il rivelatore (e) dove vengono contati con grande accuratezza.

Biografia

Egidio Longo insegna alla Sapienza Università di Roma e svolge attività di ricerca in fisica delle particelle elementari. È membro della collaborazione Cms che conduce un esperimento al Large Hadron Collider del Cern di Ginevra.

Link sul web

<http://www.forbes.com/sites/briankoberlein/2016/04/16/measurements-of-neutron-decay-disagree-and-we-dont-know-why/#39b1c03a1a12>

<https://www.scientificamerican.com/article/neutron-lifetime-mystery-new-physics/>

<http://physicsworld.com/cws/article/news/2013/dec/04/mystery-of-neutron-lifetime-discrepancy-deepens>

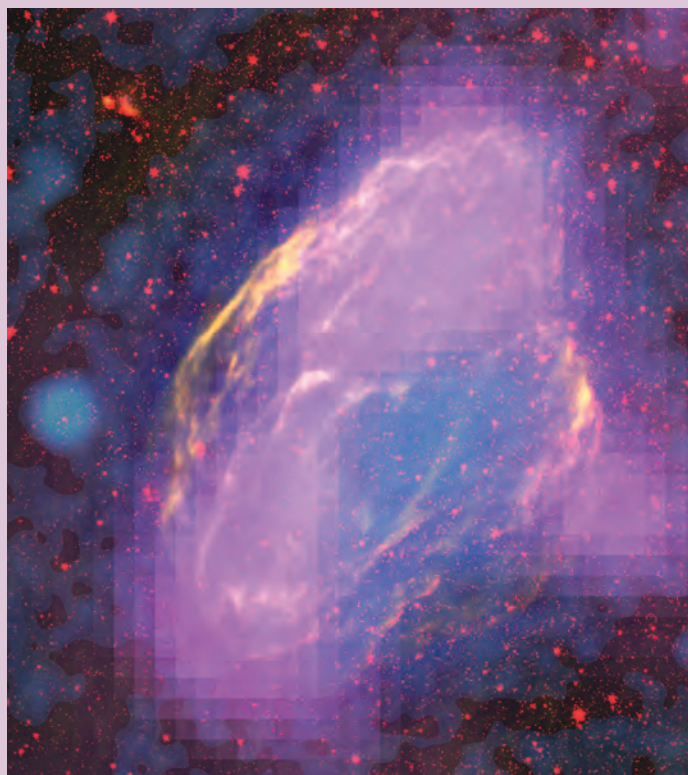
DOI: 10.23801/asimmetrie.2017.22.4

Star Track

Mettere a fuoco l'universo

di Luca Latronico

a.
Mappa composta della supernova W44. L'emissione gamma registrata da Fermi, in viola, è sovrapposta a osservazioni in X (blu) del satellite Rosat, infrarosso (rosso) di Spitzer e radio (arancione) del Very Large Array (Socorro, New Mexico). La risoluzione nell'immagine gamma è inferiore a quella di altre osservazioni, perché la misura della radiazione di questa energia richiede di convertire i fotoni gamma in coppie di elettrone e positrone le cui tracce vengono perturbate dagli urti che subiscono con i nuclei del convertitore.



Capita a tutti di sbagliare una foto, magari perché non è a fuoco o perché è mosso. Ma anche la foto migliore non può essere ingrandita a piacere senza perdere di nitidezza: c'è un "errore" intrinseco, legato alla risoluzione della lente dell'obiettivo e alla granularità della pellicola (o alle dimensioni del pixel in una moderna macchina digitale). Gli stessi problemi di risoluzione li ritroviamo nelle osservazioni astrofisiche, anche se qui le foto sono ottenute con raffinati telescopi che utilizzano diverse tipologie di rivelatori. Attraverso questi rivelatori, i fisici riescono a ricostruire le immagini delle stelle e delle galassie lontane, guardando alla radiazione che queste sorgenti emettono. Costruiti per risolvere i grandi problemi aperti in astrofisica, cosmologia e fisica fondamentale, come l'origine e l'accelerazione dei raggi cosmici, la natura della materia oscura o la fisica dei buchi neri, i telescopi della fisica astroparticellare *multimessenger* osservano una molteplicità di particelle diverse con energie molto elevate, fotoni, neutrini, raggi cosmici carichi e onde gravitazionali (vd. in Asimmetrie n. 21 p. 21, ndr). L'osservazione dei fotoni attraverso opportuni rivelatori è concettualmente simile alla vista del cielo notturno a occhio nudo. I fotoni si propagano in linea retta e non sono deviati da campi elettrici e magnetici, restituendoci l'immagine della sorgente da cui provengono. La densità di questa radiazione è elevata e permette di vedere migliaia di sorgenti, anche se il loro flusso decresce rapidamente con l'energia, richiedendo telescopi sempre più sensibili per captare le emissioni più energetiche e interessanti.

L'accuratezza di queste osservazioni si fonda su due concetti, in perfetta analogia a quanto sperimentiamo con un binocolo o un telescopio amatoriale. Per osservare il cielo ci occorrono dei punti di riferimento, tipicamente stelle con posizioni, nomi

e caratteristiche note. La necessità dei riferimenti diventa ancora più critica se il campo di vista del nostro strumento è piccolo e possiamo visualizzare solo poche stelle di riferimento. Dovremo poter rapidamente identificare quelle note su una mappa e affidarci a un sistema di puntamento stabile, da un semplice treppiede e fino a raffinate meccaniche di movimentazione, che non modifichi l'immagine che osserviamo mentre troviamo i punti di riferimento.

Anche tutte le osservazioni dei satelliti, dalle immagini di galassie lontane del telescopio Hubble alle rilevazioni Gps per mappare la superficie terrestre, richiedono l'uso di sistemi avanzati di tracciamento di stelle (cosiddetti *star tracker*). Questi navigatori spaziali, sistemi compatti basati su sensori e micro-processori integrati, calcolano istante per istante la direzione di puntamento del satellite che equipaggiano, confrontando la posizione delle stelle visualizzate sul sensore con cataloghi di riferimento, con una precisione di qualche secondo di arco (un 3600-mo di grado).

Il secondo concetto è quello della risoluzione, cioè la capacità dello strumento di ricostruire fedelmente l'immagine che osserviamo. Nelle macchine fotografiche digitali, una buona lente convoglia la luce su un piano, opportunamente posizionato al fuoco e suddiviso in milioni di sensori (pixel) per non mescolare sul singolo sensore la luce proveniente da punti lontani. I telescopi sviluppati nei laboratori di ricerca sono ottimizzati in tutti gli aspetti che influenzano la ricostruzione dell'immagine, dai sistemi di focalizzazione della radiazione incidente, alla granularità e sensibilità dei singoli sensori che la raccolgono e la trasformano in segnali elettrici, alla dinamica dell'elettronica che li elabora in segnali digitali, al software che viene utilizzato per comporre le immagini.

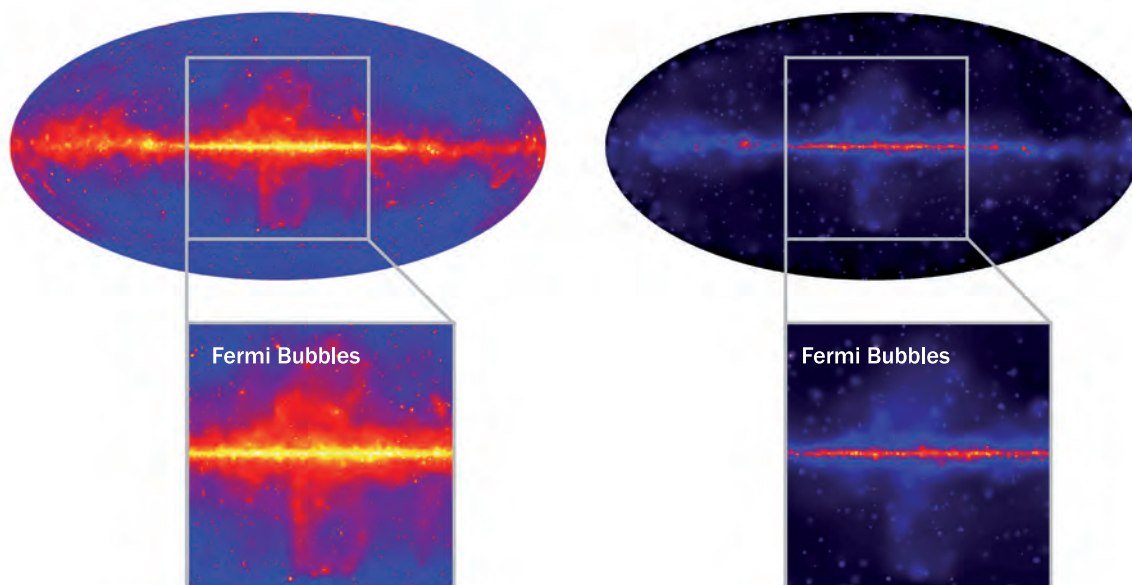
Nelle osservazioni scientifiche ci si dota di un modello matematico della risposta dello strumento in un singolo punto luminoso, chiamato *point spread function* (Psf), che descrive come un singolo punto venga “spalmato” su un’area più grande a causa di effetti strumentali. La Psf si ottiene attraverso simulazioni e calibrazioni dirette degli strumenti e la sua formulazione analitica consente di elaborare la risposta a immagini morfologicamente complesse e di analizzare le osservazioni in maniera quantitativa, per esempio per contare quanti fotoni associare a ciascuna sorgente nel campo di vista o all’interno di una struttura estesa e complessa come il resto di una supernova.

L’astrofisica moderna misura l’intero spettro elettromagnetico, dalle emissioni infrarosse, legate alla temperatura delle stelle e con energie di millesimi di eV (meV), fino alla radiazione X e gamma da mille (keV) a mille miliardi (TeV) di volte più energetica del visibile (vd. in *Asimmetrie* n. 10 p. 4, ndr). Per studiare i fotoni gamma di origine cosmica, i messaggeri per noi più interessanti perché associati a enormi trasferimenti di energia nell’universo, l’Infn ha costruito il “tracciatore a microstrip di silicio” più grande per lo spazio, di ben 73 m² di superficie attiva. È il Large Area Telescope (Lat), che opera sul satellite Fermi a 560 km di

altitudine, fuori dello schermo dell’atmosfera terrestre (vd. in *Asimmetrie* n. 10 p. 39, ndr). Il Lat è disegnato per misurare l’energia e la direzione dei fotoni attraverso la loro conversione in coppie elettrone-positrone. Per fotoni con energia di alcune centinaia di MeV la risoluzione angolare dell’apparato è di qualche grado e migliora fino a un decimo di grado per energie maggiori di 1 GeV. Selezionando i fotoni di alta energia si possono quindi ottenere immagini delle sorgenti con migliore risoluzione. I telescopi per raggi X, come Chandra o Xmm, invece, sono dotati di specchi riflettenti a incidenza radente, in grado di focalizzare i fotoni su speciali sensori di raccolta ad altissima granularità. La loro risoluzione si aggira pertanto intorno a valori tipici di qualche decina di arcosecondo. Di recente l’Infn ha introdotto un nuovo rivelatore di radiazione X, il *gas pixel detector* (Gpd), che per la prima volta permette di misurare efficacemente la polarizzazione della radiazione incidente, fortemente legata alla geometria della sorgente. I Gpd sono il cuore di una nuova classe di missioni spaziali come quella recentemente approvata dalla Nasa, Ixpe, capaci di realizzare vere e proprie mappe di polarizzazione della radiazione emessa da sistemi con campi gravitazionali e magnetici estremi, come buchi neri e stelle di neutroni.

b.

Il cielo gamma di Fermi osservato ad alta (sinistra) e altissima energia (destra), con un ingrandimento della zona del centro galattico e delle Fermi Bubbles, una sorgente estesa 50.000 anni luce di natura ignota, che potrebbe essere il residuo dell’eruzione preistorica di un buco nero super-massiccio al centro della Via Lattea. Il confronto tra le immagini mostra l’effetto combinato del flusso delle sorgenti, che cresce molto velocemente a bassa energia e determina la maggiore intensità e numero di sorgenti nella mappa di sinistra, e della risoluzione del Lat, che migliora ad alta energia e permette di avere immagini più nitide quando utilizziamo solo i fotoni di altissima energia (a destra).



Biografia

Luca Latronico è un ricercatore dell’Infn a Torino. Per scoprire da dove arrivano i raggi cosmici e come è fatta la materia oscura, progetta rivelatori per la fisica astroparticellare. Ha lavorato a Pisa, Genova e Torino per l’esperimento Cms a Lhc, l’osservatorio Auger in Argentina e le missioni spaziali Fermi, di cui è responsabile italiano, e Ixpe.

Link sul web

<https://www.nasa.gov/content/fermi-gamma-ray-space-telescope>
<https://wwwastro.msfc.nasa.gov/ixpe/index.html>

DOI: 10.23801/asimmetrie.2017.22.5

Il fantasma dell'Opera

Il caso dei neutrini superluminali

di Lucia Votano

a.
L'affollatissimo seminario al Cern del 23 settembre 2011, in cui l'esperimento Opera annunciò l'anomalia individuata nella velocità dei neutrini.



Misterioso neutrino! Il racconto della sua storia scientifica si è subito tinto di giallo. La misteriosa scomparsa di buona parte dei neutrini attesi dal Sole ha intrigato per anni tanti fisici che, tessera dopo tessera, hanno alla fine rivelato che l'assassino era proprio il neutrino stesso, o meglio la sua capacità di trasformarsi oscillando da uno all'altro dei tre tipi (o "sapori") in cui si manifesta. Come un navigato uomo di spettacolo il neutrino ha quindi sempre amato sorprendere e salire agli onori della cronaca. L'ultimo esempio risale al 2015 con l'assegnazione del premio Nobel per la fisica ad Art McDonald e Takaaki Kajita per le oscillazioni dei neutrini.

Il colpo di teatro più azzardato l'ha però tentato a settembre 2011 quando, in un affollatissimo seminario tenutosi al Cern (vd. fig. a, ndr), sostenne di essere riuscito a superare la velocità della luce, suscitando un putiferio nella comunità scientifica e nei media di tutto il mondo, allertati da indiscrezioni già uscite in precedenza. Il sorprendente risultato era stato ottenuto al laboratorio del Gran Sasso dall'esperimento Opera, che dal

2008 al 2012 ha scoperto l'apparizione di cinque neutrini tau nel fascio puro di neutrini muonici Cngs (Cern Neutrinos to Gran Sasso), fornendo così la prova diretta dell'oscillazione dei neutrini muonici in neutrini tau. Il fascio Cngs, prodotto al Cern come risultato della collisione di protoni accelerati ed estratti dell'acceleratore Sps (Super Proton Synchrotron) su un bersaglio di grafite, era inviato sotto la crosta terrestre verso il laboratorio italiano. Con il superamento della velocità della luce entrava in crisi uno dei capisaldi della fisica contemporanea e, in particolare, della teoria della relatività speciale di Einstein, per la quale la velocità della luce c nel vuoto è in assoluto la più alta raggiungibile da qualunque particella.

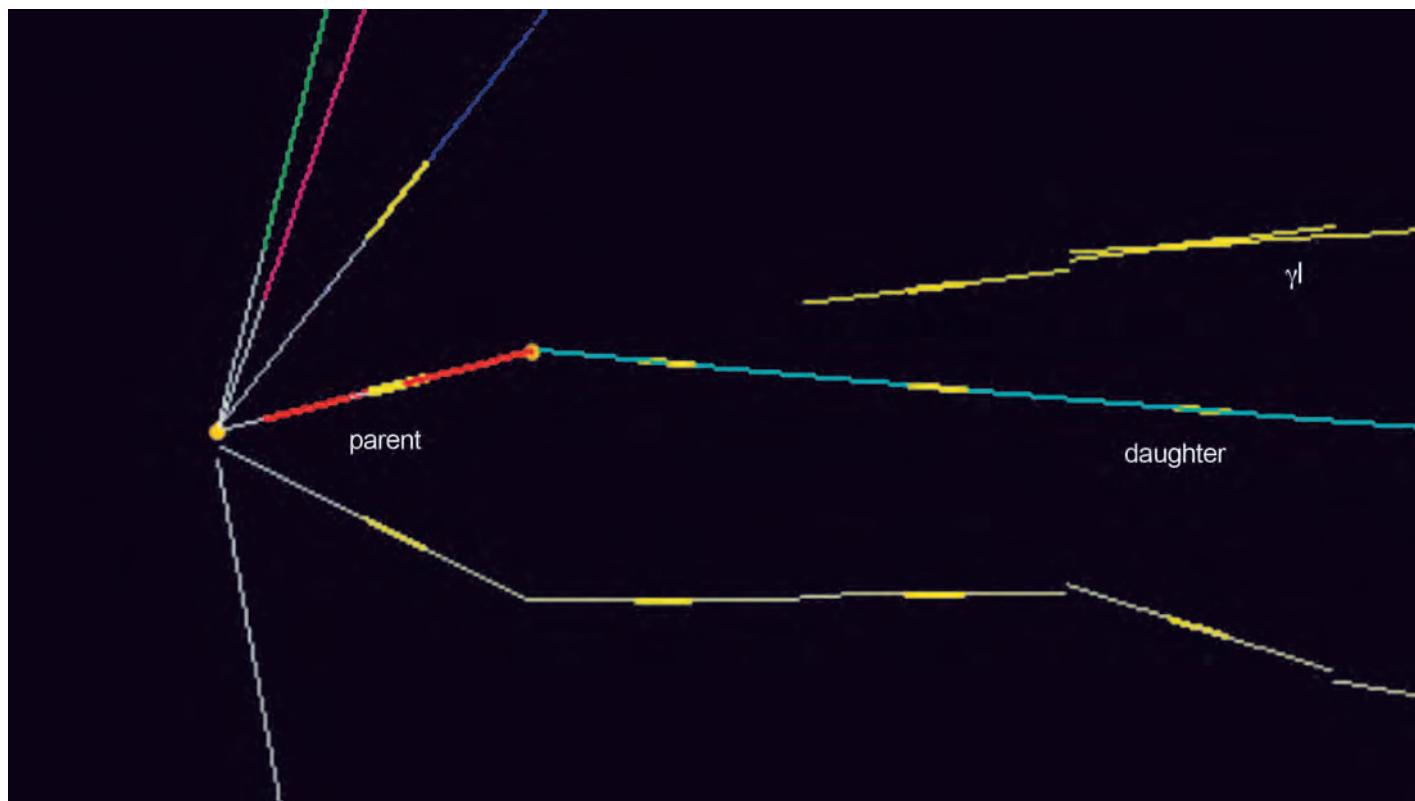
Più precisamente, i risultati indicavano, con una significanza statistica altissima (pari a $6,2 \sigma$), che i 15.223 neutrini misurati da Opera erano arrivati al Gran Sasso in anticipo di 57,8 ns (miliardesimi di secondo) rispetto al tempo che avrebbe impiegato la luce nel vuoto e che la deviazione relativa delle due velocità era di circa una parte su 100.000.

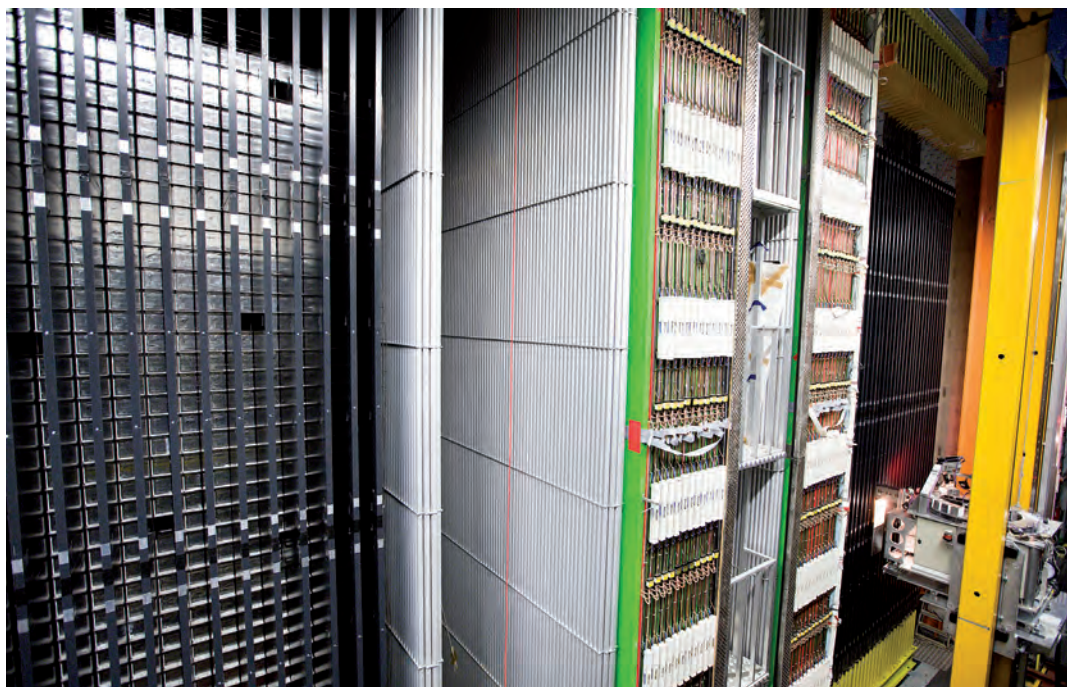
Il risultato di Opera era stato ricavato da misure complesse e molto precise del tempo di volo dei neutrini e della distanza percorsa, circa 730 km, dal Cern al Gran Sasso (vd. anche in *Asimmetrie* n. 17 l'approfondimento a p. 41, ndr). Il tempo di volo, ad esempio, non era misurabile individualmente per ogni neutrino, non essendo possibile identificare quale, tra i tantissimi protoni estratti ciclicamente per 10,5 μ s (milionesimi di secondo) dall'anello Sps, fosse il suo progenitore. Era invece ottenuto dal confronto in coordinate Utc (il "tempo coordinato universale", ovvero il fuso orario di riferimento da cui sono calcolati tutti gli altri fusi orari del mondo) tra la distribuzione temporale degli eventi di Opera e la probabilità di emissione dei neutrini, ricavata dalla misura della distribuzione temporale dei protoni limitatamente alle estrazioni che avevano generato un evento. La sincronizzazione al nanosecondo era stata ottenuta grazie a due identici sistemi Gps e orologi al cesio, molto precisi, installati appositamente nel 2008 da Opera al Cern e al Gran Sasso, calibrati dall'Istituto federale di metrologia svizzero e controllati nel 2011 dall'Istituto federale tedesco di metrologia.

Inoltre, si era tenuto conto o valutato con grande scrupolo e meticolosità ogni possibile effetto dovuto a incertezze nella conoscenza della posizione di partenza del neutrino e del vertice dell'interazione, tempi di transito e ritardi introdotti da rivelatori, cavi, schede di elettronica, ecc. La distanza percorsa dai neutrini era infine nota con un errore di soli 20 cm (corrispondente a un errore di meno di 1 ns) a seguito di campagne di rilevazioni geodetiche eseguite al Cern e al Gran Sasso. I sistemi Gps installati da Opera potevano anche monitorare continuamente i movimenti della crosta terrestre. Opera pubblicò in rete i risultati, dopo una votazione e vivaci discussioni all'interno della collaborazione sulla necessità o meno di procedere con più analisi parallele e con addizionali controlli, in aggiunta ai tanti e meticolosi già eseguiti, nonché ai calcoli di tutti gli effetti noti che avrebbero potuto inficiare la misura. La notizia dei neutrini superluminali provocò la pubblicazione in rete di un impressionante numero di articoli teorici che tentavano di conciliare la misura di Opera con le inconfutabili prove sperimentali della relatività. A dicembre 2011 c'è un nuovo colpo di

scena. Rimisurando il ritardo introdotto dagli 8,3 km di fibra ottica che portava il segnale Utc dei laboratori dalla superficie fino alla scheda elettronica che produceva il *master clock* per l'esperimento - all'interno del tunnel del Gran Sasso -, si trovò un valore di 73,2 ns maggiore di quello misurato nel 2006 e nel 2008. Si scoprì poi che la causa era tanto semplice quanto "ben nascosta": una cattiva connessione del cavo che, riducendo l'ampiezza del segnale, produceva in ultima analisi una sottostima del tempo di volo. Ripristinando correttamente la connessione, il valore tornava quello misurato in precedenza. Durante altri controlli a tutta la catena di temporizzazione degli eventi, si riscontrò inoltre che l'oscillatore del *master clock*

b.
Immagine del primo evento tau e del suo decadimento misurato in Opera nel maggio del 2010.





b. Dettaglio dell'esperimento Opera nei Laboratori Nazionali del Gran Sasso dell'Infn. Opera ha fornito la prova diretta dell'oscillazione dei neutrini da muonico a tau mediante la misura di cinque neutrini tau, risultato dell'oscillazione dei neutrini muonici del fascio Cngs.

non era stato perfettamente calibrato, con la conseguenza che la temporizzazione di ogni evento era sovrastimata di una quantità dipendente dalla posizione nel ciclo di acquisizione degli eventi. Una nuova informazione arrivò, infine, dall'analisi congiunta di Opera e Lvd (il Large Volume Detector, un altro esperimento installato nei Laboratori del Gran Sasso) dei tempi di attraversamento di circa trecento muoni atmosferici orizzontali in coincidenza nei due rivelatori, posti a distanza reciproca di 160 m. Fu chiaro che il cavo era stato reinserito malamente nel 2008 e si ebbe la conferma che, da quel momento in poi, la temporizzazione degli eventi di Opera era falsamente anticipata di quasi 60 ns. Individuato l'errore strumentale, il 23 febbraio del 2012 l'Infn e il Cern diffusero congiuntamente una nota di Opera per comunicare che erano stati identificati due effetti che, in versi opposti, potevano aver sostanzialmente inficiato la misura precedente. Nel frattempo, dopo il clamoroso annuncio dei neutrini superluminali, anche altri esperimenti dei Laboratori del Gran Sasso (Borexino, Icarus, Lvd) avevano deciso, incoraggiati e sostenuti dalla direzione del laboratorio, di misurare la velocità dei neutrini, migliorando i rispettivi sistemi di temporizzazione degli eventi. Anche il Cern si era attrezzato per modificare per brevi periodi il ciclo di Cngs, in modo da inviare impulsi di neutrini molto brevi (di qualche nanosecondo), separati opportunamente tra loro, consentendo così la misura del tempo di volo di ogni singolo neutrino. Icarus e Borexino, utilizzando i dati raccolti in questi *run* speciali, pubblicarono, rispettivamente, a marzo e a luglio 2012 i loro risultati che confutarono ogni anomalia. Anche Opera, rianalizzando i dati del 2009-2011, alla luce di quanto scoperto, pubblicò un nuovo risultato nel luglio 2012, del tutto compatibile con la relatività di Einstein. L'anomalia era definitivamente rientrata e, con i dati raccolti nei *run* speciali, Opera pubblicò a dicembre, separatamente per neutrini e antineutrini, la misura statisticamente più precisa mai ottenuta della velocità dei neutrini. Il 28 marzo 2012 la direzione del Gran Sasso organizzò un

seminario pubblico in cui gli esperimenti coinvolti nella misura presentarono i propri risultati, tutti compatibili con la relatività di Einstein. L'evento ha assunto anche un valore simbolico: si chiudeva la vicenda iniziata con il seminario tenutosi al Cern, lì dove l'anomalia era stata misurata si ristabiliva la verità scientifica e non solo con l'esperimento Opera, ma con le misure di più esperimenti dei Laboratori.

La scienza ancora una volta aveva saputo correggere se stessa seguendo quel metodo basato sulle "sensate esperienze" di cui parla Galileo Galilei: ogni risultato di un esperimento per diventare "verità" scientifica deve poter essere riprodotto da chiunque ripeta la misura. Molto rimane ancora da scoprire sulla natura dei neutrini e gli esperimenti in corso o programmati ci aiuteranno a capire meglio queste elusive e misteriose particelle. Il neutrino tornerà ancora alla ribalta della scena scientifica, ma sicuramente con maggiore prudenza.

Biografia

Lucia Votano, ricercatrice associata all'Infn, dal 2009 al 2012 è stata direttore dei Laboratori Nazionali del Gran Sasso (Lngs). Dopo l'attività iniziale in fisica sperimentale delle particelle elementari al Cern e a Desy-Amburgo, si è principalmente occupata di fisica astroparticellare con gli esperimenti Rog ai Laboratori Nazionali di Frascati e Lvd e Opera ai Lngs. Al momento è impegnata nell'esperimento Juno da realizzare in Cina entro il 2020. È autrice del libro divulgativo "Il fantasma dell'universo - Che cosa è il neutrino", Carocci editore.

Link sul web

<http://operaweb.lngs.infn.it>

DOI: 10.23801/asimmetrie.2017.22.6

Einstein al limite

Le crisi che aiutano a crescere

di Stefano Liberati

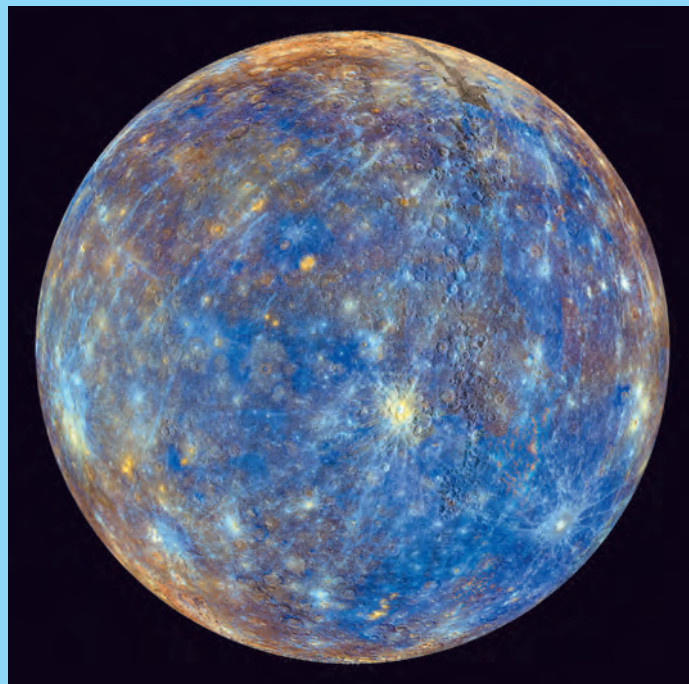
“Einstein aveva torto”. Quante volte abbiamo letto titoli simili su giornali o siti web di divulgazione scientifica. Ma le teorie scientifiche possono essere sbagliate? Certo! I cestini dei fisici teorici sono pieni d’idee che non hanno trovato riscontro nella realtà. Eppure è corretto dire che buone teorie scientifiche non possono mai essere realmente sbagliate. Infatti, l’invenzione scientifica non è mai un fatto scorrelato dal passato e nuovi modelli finiscono sempre per poggiarsi su teorie scientifiche che hanno già mostrato di poter predire i fenomeni fisici nello stesso ambito. Le nuove teorie estendono le precedenti, non le rimpiazzano.

Per questo la scienza è impegnata nella costante ricerca di osservazioni che contraddicano la teoria dominante, perché queste osservazioni sono la chiave per estenderla. Ma un’osservazione anomala (posto che sia corretta) non prova necessariamente che la teoria abbia raggiunto il suo limite predittivo. Nel 1781 William Herschel scoprì il pianeta Urano, ma quasi subito fu notato che il suo moto era in disaccordo con le predizioni della gravità newtoniana. Fu così che nel 1846 il matematico francese Le Verrier ipotizzò l’esistenza di un altro pianeta, ancora più esterno, predicendone la posizione sulla base della teoria newtoniana. Quello stesso anno fu individuato Nettuno a solo un grado di distanza dalla predizione di Le Verrier. Pochi anni più tardi (1859) lo stesso Le Verrier si cimentò in uno studio del moto di Mercurio, il pianeta più vicino al Sole. Già dal 1843 si era notato come il perielio dell’orbita del pianeta (il suo punto di massima vicinanza al Sole) mostrasse uno spostamento angolare (“precessione”) anomalo (sebbene di soli 43 secondi d’arco, poco più di un centesimo di grado, ogni secolo) (vd. anche in *Asimmetrie* n. 5 p. 34, ndr). In analogia con la predizione di Nettuno, Le Verrier adottò la stessa idea: postulò quindi l’esistenza di un piccolo pianeta più vicino al Sole, Vulcano. Negli anni a venire molti astronomi cercarono invano questo pianeta. In questo caso si dovette quindi accettare la conclusione che nulla era stato trascurato nei dati del problema, e che la teoria di Newton in queste circostanze fallisse. Il limite era stato raggiunto.

Nel caso della gravità newtoniana il limite consisteva nel fatto che la teoria si può applicare per campi gravitazionali deboli e lentamente variabili, a velocità basse rispetto a quelle della luce. Mercurio più di tutti gli altri pianeti sente la forza della gravità del Sole e non soddisfa appieno queste condizioni, così per predire la precessione del perielio è, in effetti, necessaria una teoria più sofisticata: la relatività generale.

La stessa relatività generale è un buon esempio per questo tema. Pur essendo basata su fondamenta radicalmente

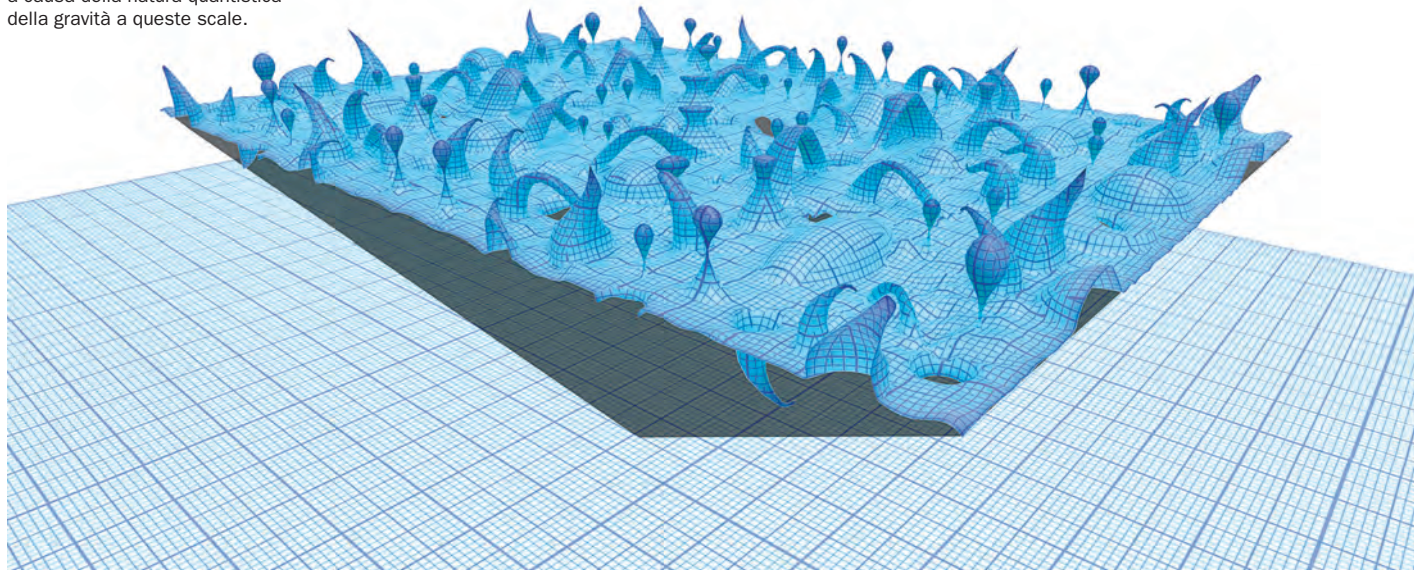
a.
Il pianeta Mercurio in “falsi colori”, ripreso dalla sonda Messenger della Nasa. Il moto anomalo di Mercurio rappresentò la prima conferma della relatività generale.



diverse dalla teoria newtoniana (con l’introduzione del concetto di campo gravitazionale, e con la sua interpretazione della gravità come curvatura dello spaziotempo) essa si riduce alla precedente teoria nel suddetto limite di campi deboli, quasi statici e a basse velocità. La teoria di Newton non è quindi sbagliata, è solo una parte di una teoria più vasta e complessa, e quindi più predittiva.

Per quanto riguarda invece la determinazione del limite di applicabilità della relatività generale, è notevole che non dovremo aspettare un’osservazione come la precessione del perielio di Mercurio per conoscerlo. Infatti, i cosiddetti teoremi di singolarità di Penrose, Hawking ed Ellis hanno dimostrato che la relatività generale cessa di essere predittiva sia all’inizio della storia del nostro universo (al cosiddetto Big Bang) sia alla fine di un collasso gravitazionale, quando una stella morente forma un buco nero. In questi casi i fisici parlano di singolarità, un termine accattivante per dire che la teoria non è più in grado di predire la forma dello spaziotempo. In tali circostanze le scale di lunghezza ed energia raggiungono la cosiddetta scala di Planck (rispettivamente, 10^{-35} metri e 10^{28} elettronVolt), alla quale una fusione tra la relatività generale e la meccanica quantistica è inevitabile.

b.
Rappresentazione artistica della struttura dello spaziotempo a piccolissime scale. È illustrato uno zoom dello spaziotempo alla scala di Planck (dell'ordine di 10^{-35} metri). Si visualizza quanto la sua struttura sia mutevole e complessa a causa della natura quantistica della gravità a queste scale.



Un'ultima riflessione è forse opportuna sulla terra di confine tra le teorie, ovvero su quei regimi in cui la teoria originaria non è più del tutto predittiva, ma ancora gli effetti della teoria più generale sono deboli. Queste "terre di mezzo" sono forse le aree di ricerca più interessanti, perché in esse si possono trovare risposte su quale teoria più generale rimpiazzerà la vecchia. Ad esempio, l'attuale modello cosmologico basato sulla relatività generale spiega le osservazioni al costo di introdurre due componenti sconosciute, la materia e l'energia oscura, che dovrebbero costituire circa il 95% dell'universo. Ma come possiamo sapere se stiamo ripetendo il successo della predizione di Nettuno o l'illusione di Vulcano? Parametrizzare il discostamento dalla teoria newtoniana permette di controllare se quello che c'è oltre il suo confine lascia le tracce tipiche della teoria di Einstein o di qualche altra teoria classica con più variabili. Finora tutto è in accordo con la relatività generale, ma siamo lontani dall'aver sondato tutte le scale immaginabili. I dati sempre più precisi in cosmologia, e la recente osservazione delle onde gravitazionali, ci permetteranno di conoscere sempre più accuratamente la terra di mezzo tra Newton ed Einstein

e di capire sempre meglio se la relatività generale sia esattamente la teoria classica della gravità, anche a grandi scale o per campi gravitazionali estremi. Ma lo studio della terra di mezzo può far di più che testare il legame tra due teorie esistenti, può forse indicarci come costruire una teoria più generale. Questo è il caso della "fenomenologia della gravità quantistica", un campo sviluppatosi negli ultimi vent'anni che mette alla prova osservativa e sperimentale possibili deviazioni nella fisica osservabile indotte da quella oltre la scala di Planck. Tali deviazioni non sono al momento predizioni univoche di una specifica teoria della gravità quantistica, ma implicazioni generali di possibili scenari. Ad esempio, la presenza di una scala di lunghezza fondamentale potrebbe implicare che la

relatività speciale valga solo alle nostre scale di energia, ma sia violata vicino alla scala di Planck. Ebbene tali congetture possono oggi essere sottoposte a verifica ad esempio attraverso le osservazioni dell'astrofisica delle alte energie. La terra di mezzo sembra essere molto ricca in questo caso, e forse ingiustamente a lungo trascurata.

Come in un processo evolutivo delle idee, le nostre teorie fisiche si trasformano e raffinano al fine di spiegare sempre meglio l'universo che ci circonda. Molte "mutazioni" non hanno seguito, altre si rivelano utili a spiegare e predire più fenomeni naturali. Non sappiamo se questo processo avrà mai fine, ma certamente solo attraverso di esso potremo progredire nella nostra conoscenza della natura.

Biografia

Stefano Liberati, astrofisico, è professore presso la Sissa di Trieste nel gruppo di fisica astroparticellare. Ha conseguito il Ph.D. nel 2000 e ha poi lavorato come *post-doc* negli Stati Uniti presso l'Università del Maryland. È membro del consiglio direttivo della Società Internazionale di Relatività Generale e Gravitazione e del suo corrispettivo italiano, la Sigrav. I suoi campi di ricerca sono nell'ambito della teoria della gravitazione, spaziando dalla fenomenologia della gravità quantistica agli aspetti termodinamici della fisica dei buchi neri.

DOI: 10.23801/asimmetrie.2017.22.7

Leggere tra le righe

La rincorsa tra teorie ed esperimenti

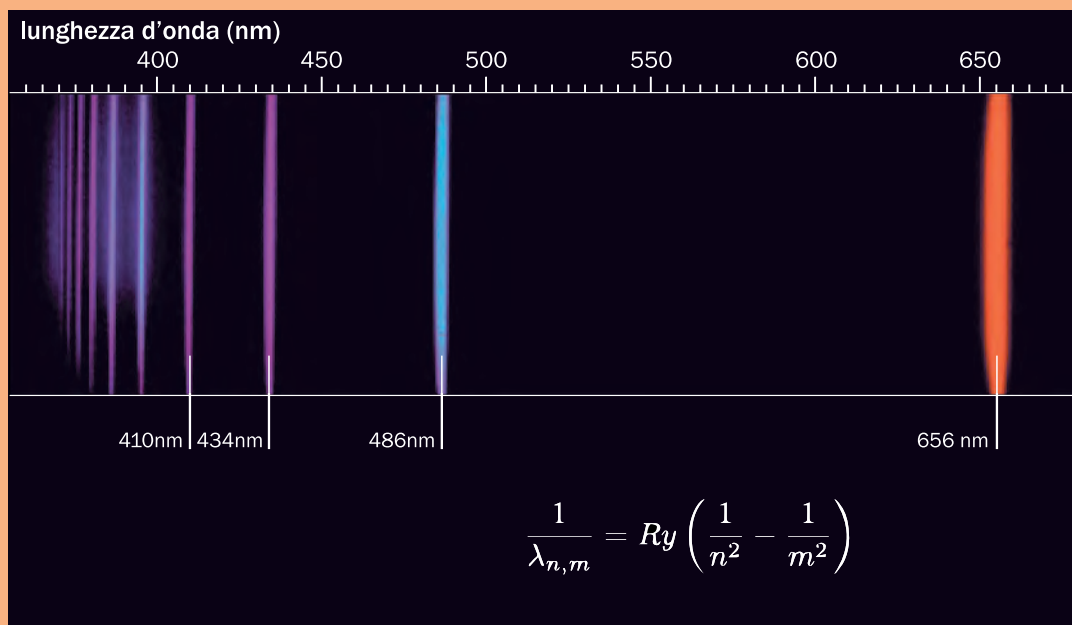
di Ettore Remiddi

La dialettica tra teoria ed esperimento è alla base del progresso in fisica. Concretamente, essa si sviluppa attraverso la proposizione di modelli sempre più precisi che devono essere confrontati con misure sperimentali con incertezze via via decrescenti, che a loro volta mettono in crisi i modelli esistenti e spingono alla ricerca di ulteriori proposte teoriche. La storia dello studio dell'atomo di idrogeno, e della sua spettroscopia, è esemplare per raccontare questa dialettica, e copre più di cento anni di storia.

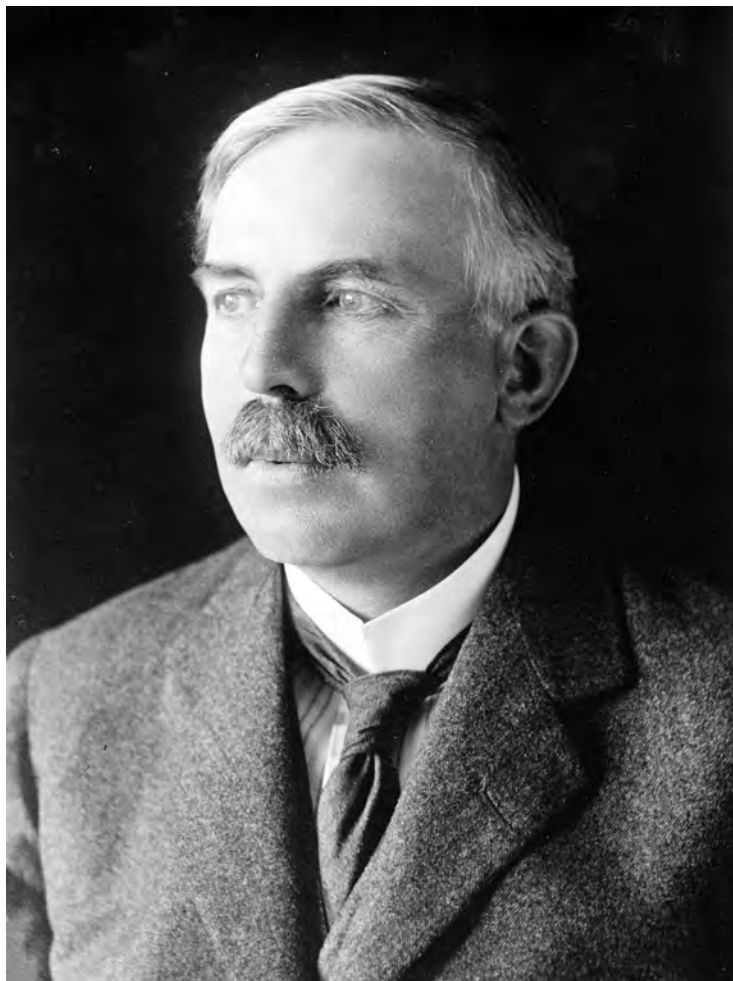
Praticamente qualunque sostanza, se gettata nel fuoco, emette colori caratteristici della sostanza stessa. Un modo di stimolare l'emissione di luce da una sostanza gassosa è farla attraversare da una scintilla elettrica. Usando questo metodo, lo svedese Anders Jonas Ångström misurò nel 1852 lo spettro di emissione dell'idrogeno con grande precisione, trovando quattro colori con lunghezze d'onda uguali a 6562,852, 4861,33, 4340,47 e 4101,74 centomillesimi di centimetro. La "strana" unità di misura da lui usata divenne rapidamente di uso standard in fisica atomica, ed è infatti ora indicata col simbolo Å e chiamata Ångström in suo onore.

Lo svizzero Johann Jakob Balmer, insegnante di matematica

di liceo con la passione di trovare un ordine nascosto in insiemi di numeri apparentemente non correlati, trovò che i quattro valori per le lunghezze d'onda misurate da Ångström si potevano ottenere da una semplice formula (essenzialmente la formula riportata in fig. a, ma con $n=2$) che dipende da un numero intero, m , e da una costante caratteristica, che ha il valore di 10.9721 cm^{-1} . Assegnando a m i valori 3,4,5,6, si ottengono i valori 6562,08, 4860,8, 4340,0 e 4101,3 – in stupefacente accordo con quelli misurati da Ångström! Cinque anni dopo, lo spettroscopista Johannes Rydberg (svedese come Ångström), studiando l'atomo di sodio, avendo trovato una formula simile anche per quell'atomo riscrisse la formula di Balmer (vd. fig. a) nella forma attuale, che dipende, oltre che dal numero m , da un altro numero intero, n . La formula prevede che le lunghezze d'onda si possono ottenere scegliendo i valori $n = 1,2,3,\dots$ e corrispondentemente $m = n+1, n+2, \dots$. La formula di Balmer corrisponde al caso particolare in cui si fissa $n = 2$. Si scoprì così ben presto che praticamente tutte le lunghezze d'onda ottenute da ogni possibile scelta per la coppia di numeri interi n e m sono effettivamente presenti anche nello spettro dell'idrogeno!



a.
Le righe spettrali emesse nel visibile dall'atomo di idrogeno. Le prime quattro da destra furono osservate inizialmente da Ångström. I valori osservati vengono riprodotti dalla formula di Rydberg-Balmer (in basso a destra nella figura) fissando $Ry=10.9721 \text{ cm}^{-1}$ e $n=2$, per $m=3,4,5, 6$.



b.
Il fisico inglese Ernest Rutherford,
scopritore della struttura atomica.

Nel 1911 Ernest Rutherford, basandosi sui suoi esperimenti con i raggi alfa, propose un modello di atomo costituito da un nucleo centrale di carica elettrica positiva, in cui è concentrata quasi tutta la massa dell'atomo, e da un opportuno numero di elettroni, di massa molto più piccola, le cui cariche negative compensano esattamente la carica positiva del nucleo. Secondo questo modello doveva esserci una interazione attrattiva tra il nucleo e gli elettroni (che hanno cariche opposte), matematicamente uguale alla attrazione gravitazionale che c'è tra il Sole e i pianeti del sistema solare. Questa attrazione avrebbe potuto spiegare la struttura interna dell'atomo, le ipotetiche traiettorie degli elettroni attorno al nucleo, e infine l'emissione di radiazione elettromagnetica da parte degli atomi. Era ovviamente naturale partire dall'atomo di idrogeno, che si sapeva avere un solo elettrone, ed era

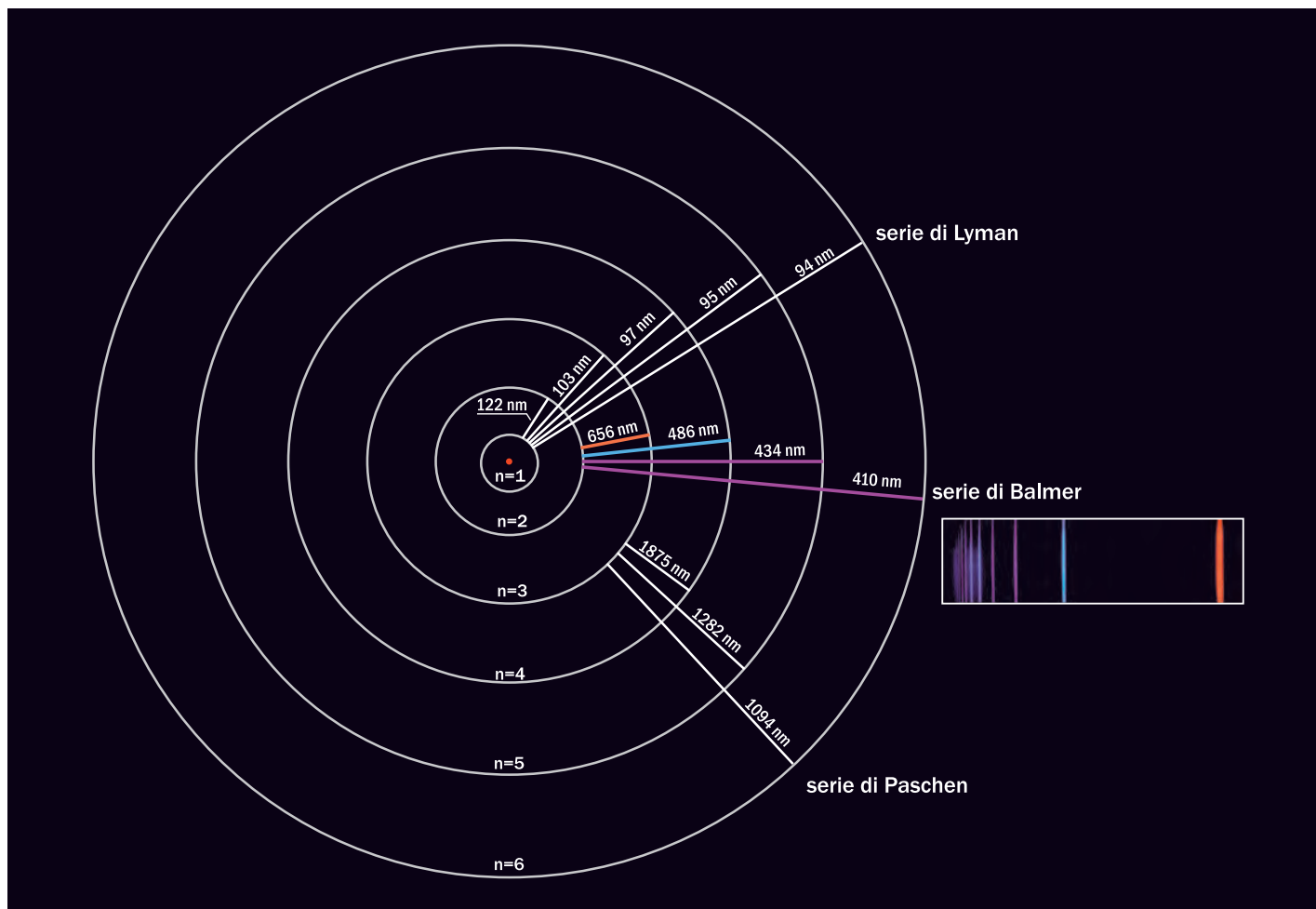
quindi l'atomo più semplice da studiare. Si poteva spiegare in questo modo anche la formula di Balmer?

La traiettoria più semplice per un elettrone attorno al nucleo dell'atomo di idrogeno è quella circolare. Inoltre, un elettrone in orbita dovrebbe emettere radiazione elettromagnetica con una frequenza (uguale all'inverso del periodo di rotazione) totalmente determinata dal raggio dell'orbita. Dato che la fisica classica permette al raggio dell'orbita di assumere un qualunque valore, ci si aspetterebbe che un atomo possa emettere radiazione di qualunque frequenza e lunghezza d'onda. Ma questo contrastava con quanto visto fino ad allora, e cioè che i valori osservati delle lunghezze d'onda sono solo quelli misteriosamente previsti dalla formula di Balmer.

Una difficoltà collegata a questa, e dalle implicazioni ancora più catastrofiche, è che l'elettrone, irraggiando, perde energia

e dovrebbe in brevissimo tempo (di molto inferiore al milionesimo di secondo) precipitare sul nucleo!

Nel 1913 il giovane Niels Bohr si rese conto che la fisica classica non poteva superare queste difficoltà, e che doveva essere modificata con l'aggiunta di nuovi postulati, essenziali per spiegare i fenomeni atomici. Bohr propose quindi che il prodotto del raggio dell'orbita dell'elettrone e del suo impulso fossero uguali a un multiplo intero di una costante, indicata con $\hbar$ ("accatagliato"), introdotta nel 1900 da Max Planck per spiegare la cosiddetta radiazione di corpo nero (vd. in *Asimmetrie* n. 20 p. 38, ndr). Da questa regola di "quantizzazione" deriva così che l'energia corrispondente alle orbite permesse viene a dipendere dal valore di un numero intero, n , e di una costante che dipende dai valori delle quantità fisiche rilevanti, e cioè la massa dell'elettrone, la sua carica elettrica e la costante $\hbar$.



Alla riga $n = 1$ corrisponde l'orbita di energia (e raggio) minima; il raggio corrispondente, indicato con il simbolo a_0 , è chiamato "raggio di Bohr". Il suo valore è $a_0 = 0,53 \text{ \AA}$. Nel modello atomico di Bohr, l'elettrone non può scendere su orbite di raggio (e quindi di energia) inferiori a questo valore. Bohr propose inoltre che l'elettrone potesse passare da un'orbita individuata dal numero intero m a un'altra a energia più bassa, e quindi corrispondente a un numero intero n più piccolo, emettendo un fotone di energia pari alla differenza tra le energie delle due orbite. Legando l'energia del fotone alla sua lunghezza d'onda, si ottiene quindi che questa dipende da due numeri interi, m ed n , proprio come previsto dalla formula di Balmer-Rydberg. Inoltre, la costante che appariva in questa formula può essere ora calcolata a partire dalle quantità fisiche in gioco, trovando il valore $109737,315685 \text{ cm}^{-1}$, in ottimo accordo con il valore empirico ottenuto confrontando la formula di Balmer-Rydberg con i dati sperimentali! Arnold Sommerfeld, uno dei grandi fisici teorici dei primi decenni del '900, perfezionò

il modello di Bohr. Grazie alla sua completa padronanza della meccanica analitica, riformulò in maniera matematicamente meglio definita la condizione di quantizzazione, il che gli permise di studiarne le conseguenze anche per generiche orbite ellittiche, oltre che per le orbite circolari. Trovò così che, in analogia al caso dell'attrazione newtoniana, in cui si possono avere orbite di eccentricità diversa ma energia uguale, si potevano avere orbite atomiche di eccentricità diversa ma con la stessa energia. Inoltre Sommerfeld considerò anche gli effetti previsti dalla relatività speciale per le orbite degli elettroni. Si accorse così che questi, anche se tutto sommato abbastanza piccoli dato che la velocità dell'elettrone è circa un centesimo di quella della luce, potevano dare contributi leggermente diversi alle energie di orbitali di diversa eccentricità. Questa piccola differenza, chiamata "struttura fine", risultò proporzionale al quadrato di una costante, che Sommerfeld chiamò α , data da $e^2 / \hbar c$, ovvero dal quadrato della carica dell'elettrone diviso per il prodotto tra $\hbar$ e la velocità della luce c .

c.
Il modello atomico di Bohr. Le orbite permesse sono indicate da un numero intero n . A ogni transizione tra due orbite, corrisponde una determinata lunghezza d'onda, predetta dalla formula di Balmer-Rydberg. La serie di Balmer, le cui righe sono nelle lunghezze d'onda del visibile, corrisponde alle transizioni tra l'orbita con $n=2$ e le orbite contrassegnate da $m=3,4,\dots$ La serie di Lyman è data dalle transizioni tra $n=1$ e $m=2,3,\dots$, e la serie di Paschen da quelle tra $n=3$ e $m=4,5,\dots$

Sperimentalmente, il suo valore numerico, quando Sommerfeld la introdusse, era all'incirca $1/137$. Per molto tempo si pensò (o si sperò?) che quello fosse il suo valore esatto, che si cercò di riottenere con fantasiosi e strampalati argomenti numerologici, a posteriori rivelatisi senza fondamento. Il valore corrente è $1/\alpha = 137,035999...$, con un errore inferiore a una parte per miliardo - ma il numero 137 mantiene ancora il suo fascino nell'ambiente dei fisici, specie se teorici.

La struttura fine prevista da Sommerfeld nel 1916 fu subito cercata - e trovata - dagli spettroscopisti Ralph H. Fowler e Friedrich Paschen, confermando qualitativamente e quantitativamente la predizione di Sommerfeld: un altro grande successo teorico!

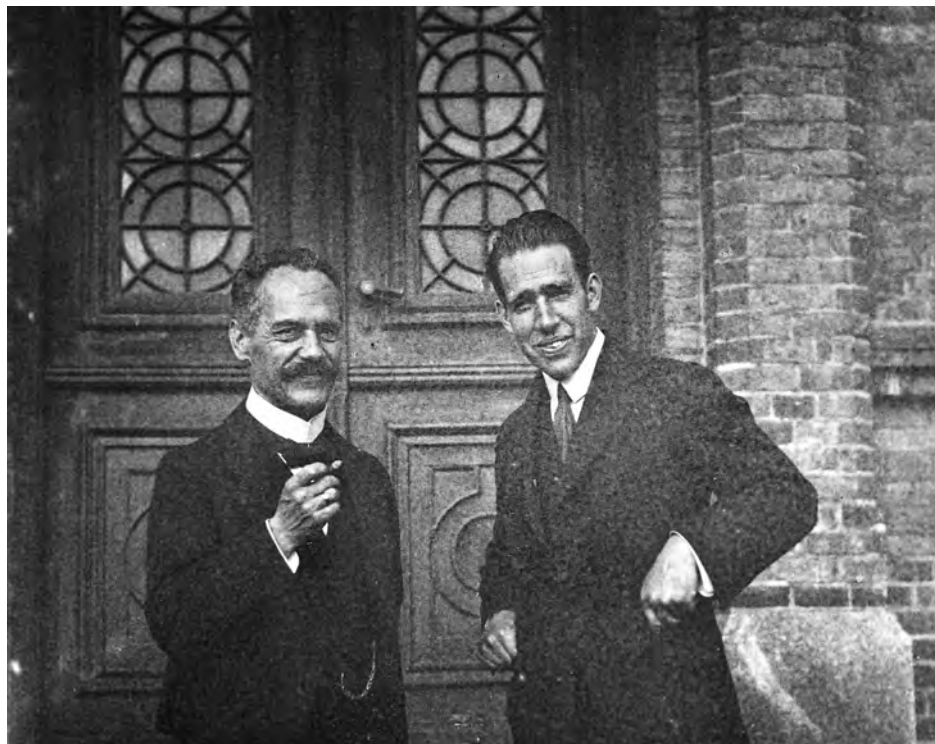
Ma la descrizione completamente soddisfacente dell'atomo di idrogeno arrivò solo circa un decennio dopo, nel 1926, quando Erwin Schrödinger

pubblicò la sua famosa equazione, tuttora alla base dell'attuale insegnamento della meccanica quantistica, e nel 1928 con l'equazione di Dirac (vd. in *Asimmetrie* n. 19 p. 22, ndr), in cui viene tenuto conto anche di tutti gli effetti della relatività speciale. Mentre l'equazione di Schrödinger riproduce facilmente la formula di Balmer-Rydberg, per ottenere la struttura fine di Sommerfeld è necessario considerare l'equazione di Dirac. Confrontando l'equazione relativistica di Dirac con quella non relativistica di Schrödinger, si trovano vari termini in più. Uno di questi corrisponde alla correzione relativistica già considerata da Sommerfeld, ma ce n'è un altro, importantissimo, dovuto allo spin dell'elettrone. L'insieme di queste correzioni consente di riottenere sia la formula di Balmer che la struttura fine di Sommerfeld!

Ma allora, viene da chiedersi, come aveva potuto Sommerfeld ottenere la (corretta) struttura fine senza tener conto dello spin? La risposta è interessante: Sommerfeld commise due "errori" che si compensarono tra di loro. Il primo è l'uso delle regole di quantizzazione di Bohr, che si rivelarono poi non del tutto corrette. Il secondo è il non aver tenuto conto dello spin. Ma se le regole di quantizzazione di Bohr non sono corrette, come si spiega il loro successo nell'ottenere la formula di Balmer? Probabilmente questo, invece, è solo un caso!

La rincorsa tra l'accuratezza delle previsioni teoriche e la precisione delle misure sperimentali riprenderà alla fine degli anni quaranta del secolo scorso con le cosiddette "correzioni radiative" (vd. in *Asimmetrie* n. 19 p. 22, ndr) portando alla formulazione dell'elettrodinamica quantistica, o QED (Quantum Electro Dynamics), che fornisce il paradigma delle teorie di campo quantistiche, su cui si basa il modello standard delle particelle elementari.

d.
Arnold Sommerfeld (a sinistra) e
Niels Bohr a Lund, in Svezia.



Biografia

Ettore Remiddi è stato allievo della Scuola Normale di Pisa. Si è laureato in Fisica nel 1963 ed è stato professore di Fisica Teorica a Bologna. Ha svolto la sua attività prevalentemente nel calcolo di correzioni radiative in QED e teoria delle particelle elementari.

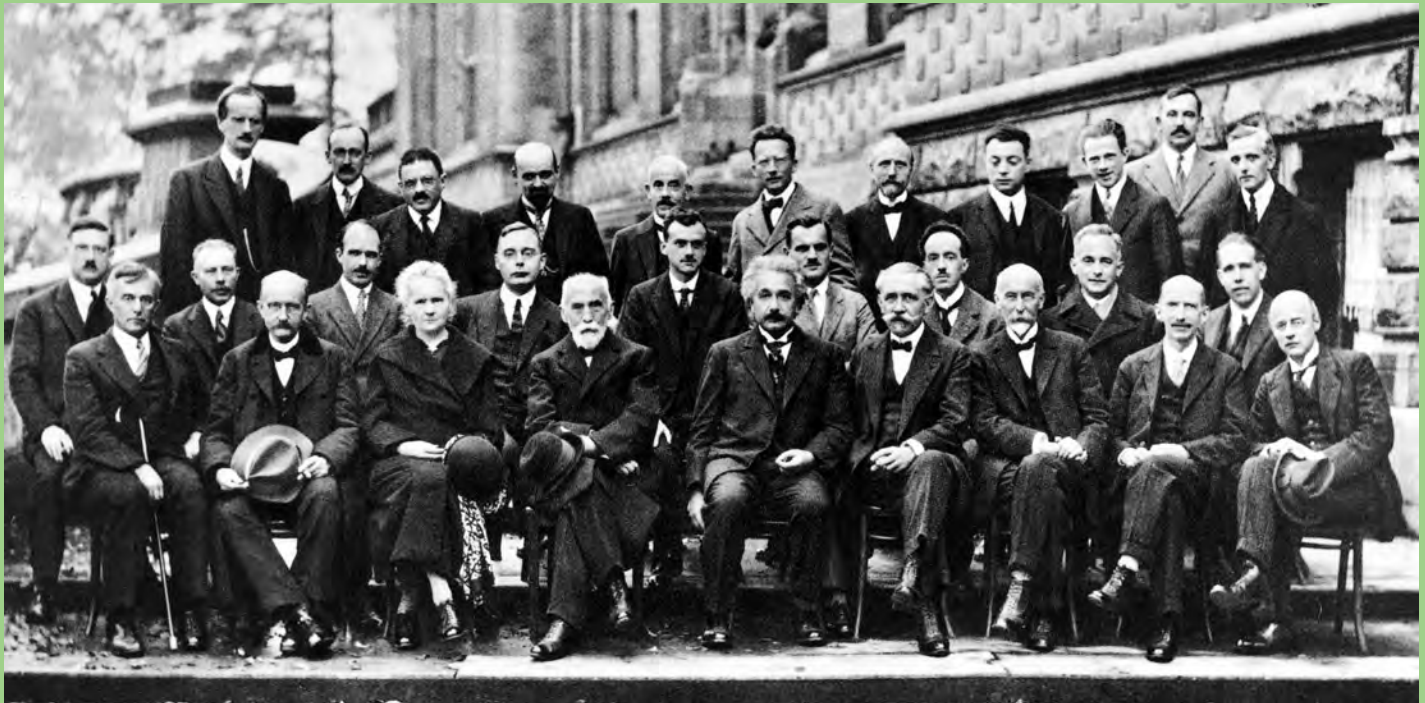
Eppur funziona

L'inspiegabile successo del modello standard

di Michele Redi

a.

Alla conferenza internazionale di Solvay del 1927 Niels Bohr, uno dei padri fondatori della meccanica quantistica, durante un acceso dibattito sulla natura controversa di questa teoria suggerì ad Albert Einstein di smetterla "di dire a Dio cosa deve fare". Nella foto, i partecipanti alla conferenza, tra cui moltissimi premi Nobel, come Erwin Schrödinger, Werner Heisenberg, Marie Curie, Wolfgang Pauli e Max Planck.



La teoria della relatività generale di Einstein fu scoperta basandosi su considerazioni puramente teoriche e può essere derivata da semplici assiomi. Attraverso esperimenti concettuali, cosiddetti "*Gedankenexperimente*", Einstein fu in grado di dedurre la teoria da principi primi traducendoli in concetti geometrici intuitivi. Le predizioni furono rapidamente confermate dagli esperimenti, ma la teoria era così convincente ed elegante che Einstein non ebbe dubbi che fosse corretta fin da subito. Disse: "Mi dispiacerebbe per Dio se la teoria non fosse corretta". Ed ebbe ragione. Lo sviluppo della meccanica quantistica, invece, fu da subito molto più accidentato. All'inizio del '900 iniziarono a emergere alcuni dati sperimentali che non potevano essere spiegati con la fisica classica. Questa piccola crepa nelle equazioni classiche di Newton e Maxwell diventò presto una voragine incolmabile e la necessità di una rivoluzione teorica fu chiara a molti, portando lentamente alla formulazione della meccanica quantistica che conosciamo. Il paradigma quantistico tuttavia era così lontano dalla fisica conosciuta e dal nostro intuito, che persino Einstein non fu mai convinto della correttezza della teoria. Anche a distanza di quasi 100 anni non esiste una

derivazione della teoria analoga alla relatività generale. Persino i principi primi non risultano chiari e vengono dibattuti. Ma la giustificazione fondamentale della teoria rimane il fatto che spiega tutti i fenomeni di cui siamo a conoscenza.

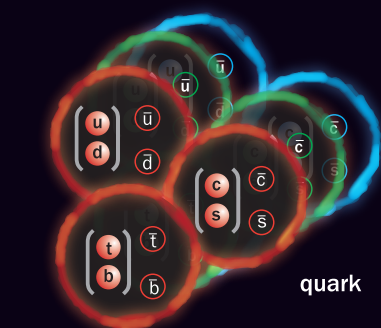
A livello microscopico la meccanica quantistica regola le interazioni tra le particelle elementari.

La comprensione del mondo delle particelle elementari è stata anch'essa una strada tortuosa, piena di ipotesi e tentativi spesso errati. In origine soltanto l'elettrone e il protone erano conosciuti come costituenti fondamentali della materia e non esisteva nessuna ragione evidente di estendere la teoria.

Successivamente, neutroni, positroni, muoni e neutrini furono scoperti. Poi arrivarono gli anni '60 e le particelle divennero così numerose e con le proprietà più disparate che persino il concetto di elementare sembrò perdere di significato. Questo fu un periodo di grande eccitazione e confusione, dove nuove scoperte avvenivano quotidianamente, ma senza che i risultati potessero essere spiegati da una teoria convincente. Fu successivamente compreso che molte di queste particelle erano in realtà composte da oggetti più semplici e simmetrici, i quark, ma che interagivano attraverso una nuova forza, l'interazione forte.

Da 1 a 118

Per descrivere tutte le particelle note in Natura e le loro interazioni, i fisici utilizzano il linguaggio della teoria quantistica dei campi. Il campo più semplice è il *campo scalare*, utilizzato per descrivere le particelle con spin uguale a zero. Nel modello standard ne abbiamo solo uno, il bosone di Higgs. Poi ci sono i bosoni vettori, ossia le particelle con spin 1. Tra questi, una distinzione utile è fra quelli che non hanno massa, come il fotone e gli otto gluoni, e quelli che invece hanno massa non nulla, come i bosoni W^+ , W^- e Z^0 . Nei primi, le configurazioni possibili per lo spin sono solo due, mentre sono tre per i bosoni con massa. Così, per esempio, il fotone ha due stati (o gradi di libertà) di spin, mentre lo Z^0 ne ha tre, e così deve essere per i rispettivi campi. Per finire, i “fermioni” (quark e leptoni) hanno spin $\frac{1}{2}$. Per quelli a massa nulla, come è il caso del neutrino nella versione più semplice del modello standard, è possibile un solo stato di spin (o di “chiralità”), per cui contando anche la rispettiva antiparticella (che ha chiralità opposta), a ogni campo di neutrino sono associati due gradi di libertà. Per i fermioni con massa invece, come elettrone, muone, tau e tutti i quark, sono possibili entrambi gli stati di chiralità,



quark

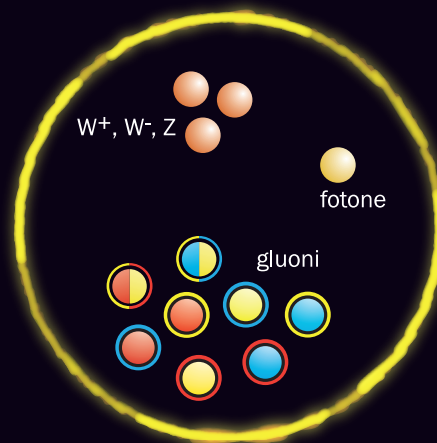


leptoni

e quindi, contando anche l'antifermione corrispondente, a ognuno di questi campi dobbiamo associare quattro gradi di libertà. Mettendo tutto insieme, e non dimenticando che i fermioni del modello standard appaiono in tre famiglie distinte, dette anche



bosoni mediatori



W^+ , W^- , Z

fotone

gluoni

“generazioni” (vd. fig. 1), e che ogni quark appare in tre colori, otteniamo un totale di 58 “campi” elementari, a cui corrispondono 118 gradi di libertà. [Massimo Pietroni]

Oggi molte cose sono diventate chiare, almeno in apparenza. La teoria del modello standard descrive tutte le forze conosciute in natura e spiega in particolare il funzionamento dell'universo a distanze microscopiche. Contiene 58 “campi” elementari per un totale di 118 gradi di libertà per le particelle elementari, che differiscono per massa, spin e interazioni (vd. approfondimento). La teoria è completamente determinata da 18 parametri che descrivono le masse e le interazioni delle particelle e da qui, in linea di principio, tutti i fenomeni fisici conosciuti possono essere derivati. L'ultimo tassello mancante, il famigerato bosone di Higgs, è stato finalmente scoperto nel 2012 dagli esperimenti del Cern a Ginevra. Questa scoperta ha un particolare significato, perché il bosone di Higgs è l'architrave necessario per la consistenza dell'intera teoria. Altre teorie richiedono modifiche del modello standard a energie attualmente inaccessibili, ma che si sono verificate durante il Big Bang e che un giorno potrebbero essere verificate sperimentalmente. Il bosone di Higgs è invece l'unica particella che consente al modello standard di essere una teoria completa, valida essenzialmente a qualunque scala di energie, senza ulteriori particelle. I successi sperimentali del modello standard, ottenuti negli ultimi 40 anni, sono strabilianti. Descrive in maniera unificata le interazioni elettromagnetiche e deboli. Descrive le interazioni tra nucleoni (che si pensava fossero mediate da un'altra

particella denominata “bosone di Yukawa”, storicamente associata al pione) come residuo dell'interazione forte che tiene insieme i quark dentro il protone e il neutrone. È una teoria consistente dal punto di vista matematico. Tuttavia è imperfetta.

Ci sono due categorie di problemi. Il primo, oggettivo, è che il modello standard non descrive alcune proprietà del nostro universo conosciute da osservazioni indirette. Tra queste forse la più eclatante è la mancanza della materia oscura, necessaria per spiegare il moto delle galassie (le particelle del modello standard possono spiegare solo circa il 25% della materia nell'universo) e molte altre osservazioni cosmologiche. Il secondo problema è di tipo estetico: proprietà sospette dal punto di vista teorico che però non sono incompatibili con le osservazioni o con la consistenza matematica della teoria. A questo riguardo, uno degli aspetti più insoddisfacenti del modello standard è l'impossibilità di determinare i parametri fondamentali della teoria. Il modello standard è eccellente per descrivere quello che conosciamo, ma non spiega mai il perché. Non sappiamo, per esempio, perché l'elettrone è duemila volte più leggero del protone o perché il protone è appena più leggero del neutrone. È lecito aspettarsi che una teoria più completa, in cui queste proprietà sono derivate da principi più semplici, esista. O almeno questo è quello che ci ha insegnato la storia della fisica fino ad oggi.

Un discorso a parte merita il bosone di Higgs. Come già detto, la consistenza matematica della teoria si basa sull'esistenza del bosone di Higgs scoperto recentemente al Cern dagli esperimenti Atlas e Cms. Questa particella è diversa da tutte le altre del modello standard per una proprietà nota come "spin", associata alla sua rotazione: è l'unica particella elementare di spin 0. Le altre particelle elementari hanno spin 1 (il fotone, i gluoni, i bosoni W e Z) oppure spin 1/2 (i quark e i leptoni). In generale, particelle di spin 0 sono difficili da giustificare dal punto di vista teorico, perché sono tipicamente molto pesanti, a meno che non siano composte (come per esempio il bosone di Yukawa). Se così fosse per il bosone di Higgs, il modello standard sarebbe incompleto e forse nuove particelle esisterebbero in natura. Ma da quanto abbiamo visto finora il bosone di Higgs si comporta come una particella elementare senza ulteriore struttura. Sotto vari punti di vista il modello standard è una teoria "sbagliata". I padri di questa teoria, contrariamente a

Einstein per la relatività generale, non la trovarono né elegante né convincente. A priori, non esisteva una ragione per preferire il modello standard ad altre teorie. Quasi tutti pensavano che fosse un'approssimazione di una teoria più completa, che sarebbe stata presto scoperta. Questo ha prodotto un'enorme attività di studio di possibili estensioni del modello standard, come ad esempio la supersimmetria (vd. in Asimmetrie n. 18 p. 13, ndr), che cercano di risolvere gli annosi problemi del modello standard. Tuttavia, anno dopo anno, esperimento dopo esperimento, il modello standard è sempre stato confermato, fino al coronamento con la scoperta del bosone di Higgs. Al momento non esiste nessuna indicazione certa su dove la fisica oltre il modello standard potrebbe comparire. Ma l'universo del modello standard è incompleto e incomprensibile. La tensione tra l'inspiegabile successo del modello standard e i suoi limiti teorici è uno dei puzzle più appassionanti della fisica contemporanea. È uno dei pochi casi dove una teoria funziona meglio

di quanto sia lecito attendersi. La motivazione principale degli esperimenti attuali è scoprire cosa c'è oltre. Il futuro ci svelerà se il modello standard verrà smentito e sostituito da una teoria migliore o continuerà a governare le forze fondamentali della natura.

Biografia

Michele Redi è un ricercatore dell'Infn a Firenze. Ha ricevuto il dottorato alla Johns Hopkins University a Baltimora nel 2004 e ha lavorato presso la New York University e il Cern. La sua attività di ricerca è incentrata sulla fisica oltre il modello standard.

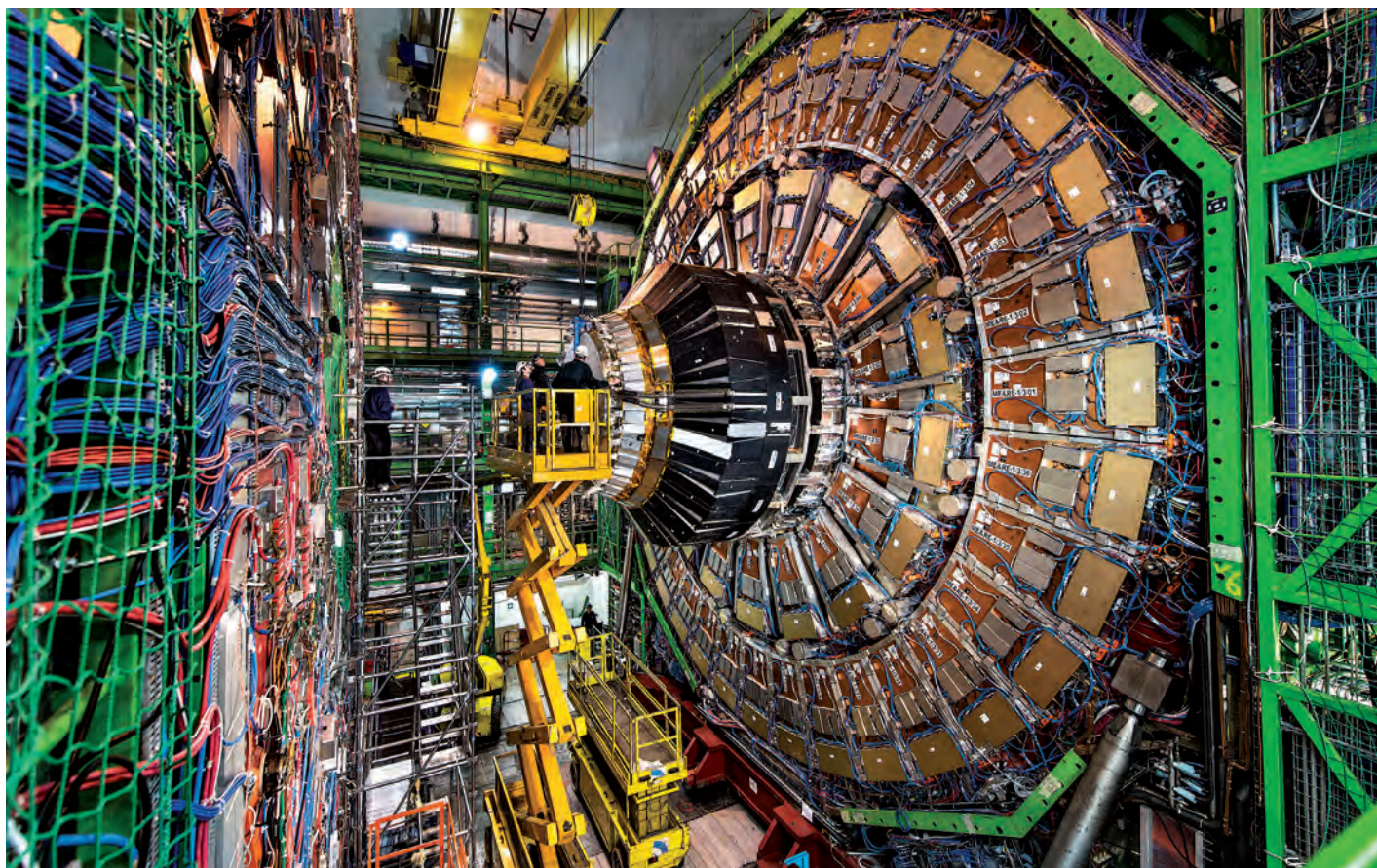
Link sul web

<https://sites.google.com/site/redi76/>

DOI: 10.23801/asimmetrie.2017.22.9

b.

L'esperimento Cms al Cern, che assieme all'esperimento Atlas ha scoperto il bosone di Higgs nel 2012.

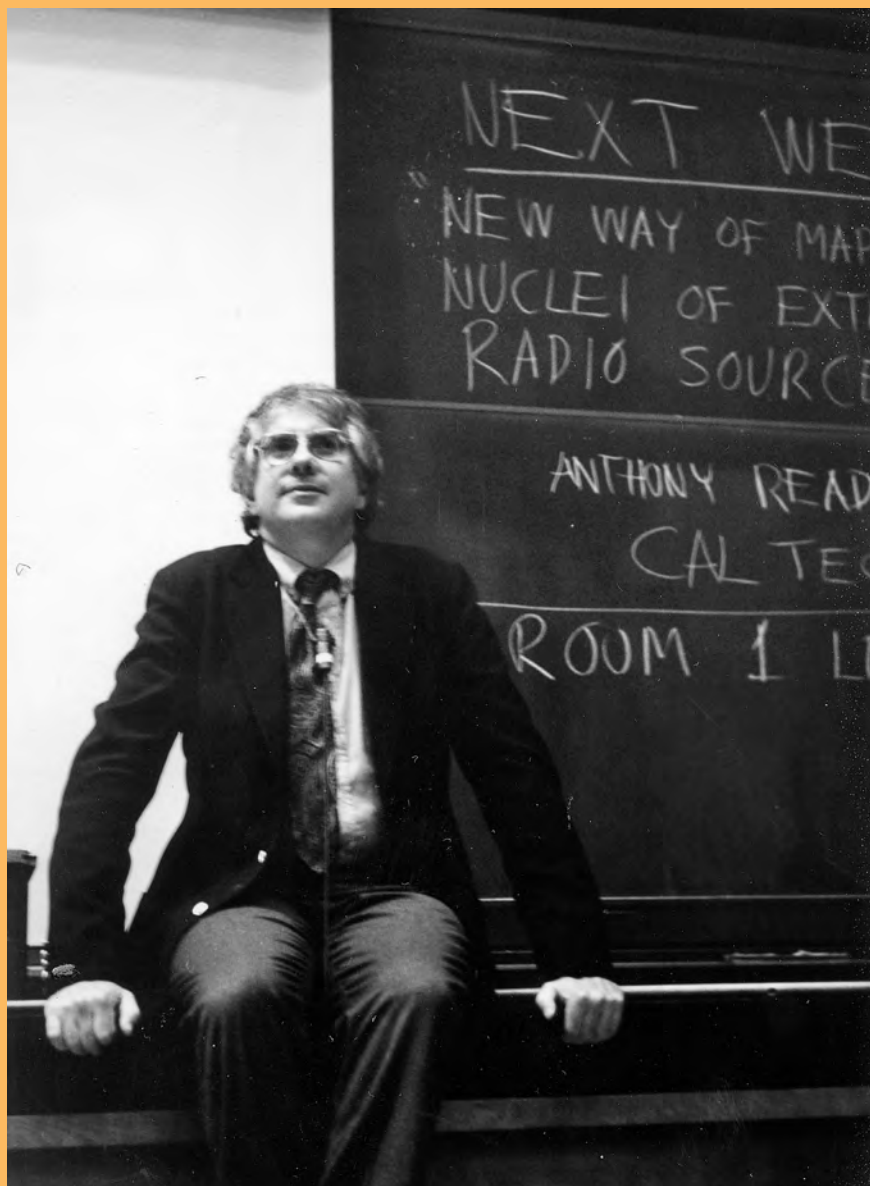


Bella e impossibile

Tentativi di una grande unificazione

di Davide Meloni

“Presentiamo una serie di ipotesi e speculazioni che conducono inevitabilmente alla conclusione che $SU(5)$ sia il gruppo di *gauge* del mondo”. Con questa frase piena di ottimismo, Howard Georgi e Sheldon Lee Glashow aprirono il loro articolo fondamentale del 1974 e, con questo, la stagione delle teorie di grande unificazione (Gut). Questa stagione è ancora aperta, dato che la teoria proposta inizialmente, pur essendo bella e semplice, purtroppo era anche sbagliata. L'idea di una teoria Gut ha come fondamento il principio che al di sopra di una certa scala di energia tutte le interazioni tra particelle sono dettate da una sola forza, la cui intensità è fissata dal valore di un'unica costante di accoppiamento (vd. in *Asimmetrie* n. 18 p. 4, ndr). Contrariamente a quanto accade nel modello standard, dove ci sono tre gruppi di simmetria con tre distinte costanti di accoppiamento, il gruppo di simmetria di una teoria Gut è unico. Tuttavia, dato che alle energie alle quali conduciamo gli esperimenti attuali sperimentiamo tre forze distinte (debole, elettromagnetica e forte) e non una sola, tale principio di “simmetria Gut” non può essere valido a tutte le energie: in gergo tecnico si dice che la simmetria è “rotta”. Il prototipo di teoria Gut proruppe in modo vigoroso nel panorama scientifico con il lavoro di Howard Georgi e Sheldon Lee Glashow già citato, chiamato per questo motivo il “modello di Georgi-Glashow”, basato sul gruppo di simmetria noto come $SU(5)$, che in “matematico” rappresenta il gruppo delle matrici speciali unitarie in cinque dimensioni (vd. in *Asimmetrie* n. 16 p. 11, ndr). L'ottimismo di Georgi e Glashow, in effetti, poteva all'epoca essere giustificato. Dal punto di vista matematico, il gruppo $SU(5)$ è sufficientemente grande da poter “ospitare” il modello standard, il che rappresenta una *sine qua non* per ogni teoria accettabile delle interazioni fondamentali ad alta energia. E, cosa altrettanto importante, tutte le particelle del modello standard sono

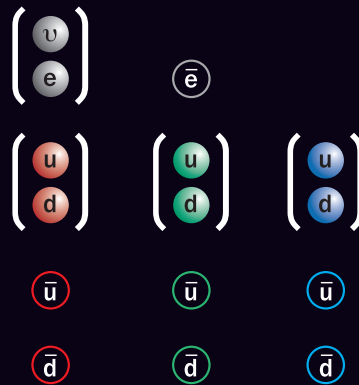


raggruppate nelle sole “rappresentazioni” (vd. approfondimento), denominate 10 e 5. In particolare, la 5 contiene tre copie del quark down (che risente della forza forte e pertanto è anche detto “tripletto di colore”) e

a.
Sheldon Glashow, che assieme a Howard Georgi lavorò al modello Georgi-Glashow.

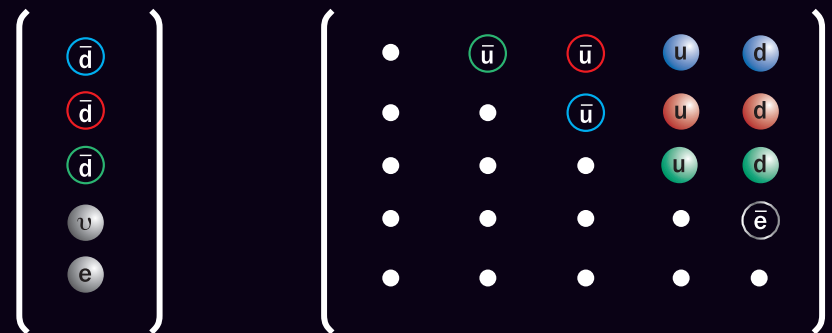
Rappresentazioni fondamentali

1.
I 15 fermioni (leptoni e quark) della prima generazione nel modello standard sono raggruppati in 4 "doppietti" del gruppo SU(2) (tra parentesi) e 7 singoletti. Nel modello di grande unificazione basato sul gruppo SU(5) tutti questi fermioni trovano posto in due sole rappresentazioni, la 5 e la 10, e non c'è spazio per nessun altro fermione non previsto nel modello standard. Una struttura del tutto analoga si realizza per la seconda e per la terza generazione.



modello standard

Gli elementi di un gruppo di simmetria devono soddisfare delle precise leggi di moltiplicazione che identificano la simmetria in questione. Una rappresentazione di tale gruppo è una "realizzazione" di queste relazioni moltiplicative in termini di matrici quadrate. Nel caso di SU(5), la rappresentazione che chiamiamo "fondamentale" è costituita da matrici 5x5. Queste matrici, a loro volta, agiscono su vettori o matrici con un numero preciso di componenti, che ne identifica la dimensione. Ad esempio, la rappresentazione 5 di SU(5) è un vettore a cinque componenti (da qui il nome "5"), quello mostrato in basso a sinistra nella fig. 1, che sono il quark down destrorso in tre copie (perché i quark sono



modello GUT SU (5)

particelle esistenti in tre copie associate a tre distinti colori), l'elettrone e il neutrino. La rappresentazione 10, invece, è una matrice 5x5 (quella mostrata in basso a destra

nella fig. 1) che ha solo dieci componenti indipendenti e che sono tre copie del quark down sinistrorso, sei copie del quark up (destrorso e sinistrorso) e il positrone.

la coppia elettrone-neutrino (che risente solo della forza elettrodebole e quindi è chiamato "doppietto debole"), mentre la 10 contiene tutte le altre particelle del modello standard. Questo significa che, ad esempio, tutte le particelle della 5 hanno interazioni identiche laddove sia valida la simmetria SU(5); e analogamente per le particelle nella 10. Questa assegnazione viene replicata tre volte per tener conto delle famiglie di fermioni oggi conosciute.

Un primo successo di SU(5) fu quello di aver spiegato in modo molto semplice il valore frazionario della carica elettrica del quark down, pari a 1/3 della carica dell'elettrone. Altrettanto impressionante fu la predizione del valore del cosiddetto "angolo di Weinberg", un numero che

nel modello standard non ha alcuna spiegazione, mentre in SU(5) risulta semplicemente dettato dalle sue proprietà gruppali.

Questi primi successi dettero una spinta decisiva allo studio delle implicazioni di SU(5) in altri settori delle interazioni fondamentali. Tuttavia, a uno scrutinio più attento e preciso, la teoria bella per la sua semplicità ed eleganza mostrò alcune crepe, che successivamente ne decretarono il fallimento, per lo meno nella sua versione originaria.

In primo luogo, questo modello non prevede affatto l'unificazione completa delle tre costanti di accoppiamento del modello standard in una sola costante. In effetti, partendo dai valori delle costanti alla scala elettrodebole ed estrapolandoli

ad alta energia, si osservano incroci di due costanti alla volta, ma mai di un unico punto in cui tutte e tre assumono simultaneamente lo stesso valore. In altri termini, non esiste una scala di energia alla quale le tre costanti di accoppiamento abbiano lo stesso valore. Un altro dei punti critici deriva dal fatto che SU(5) prevede l'esistenza di 24 mediatori della forza, 12 dei quali sono quelli noti del modello standard (il fotone, i tre bosoni vettoriali $W^\pm$ e Z , gli otto gluoni), mentre i restanti 12 sono nuove particelle la cui massa è dettata dal valore della scala di energia a cui la simmetria viene rotta. Oltre a essere supermassivi, questi 12 bosoni di *gauge* possono anche mediare il decadimento del protone (vd. in Asimmetrie n. 20 p.

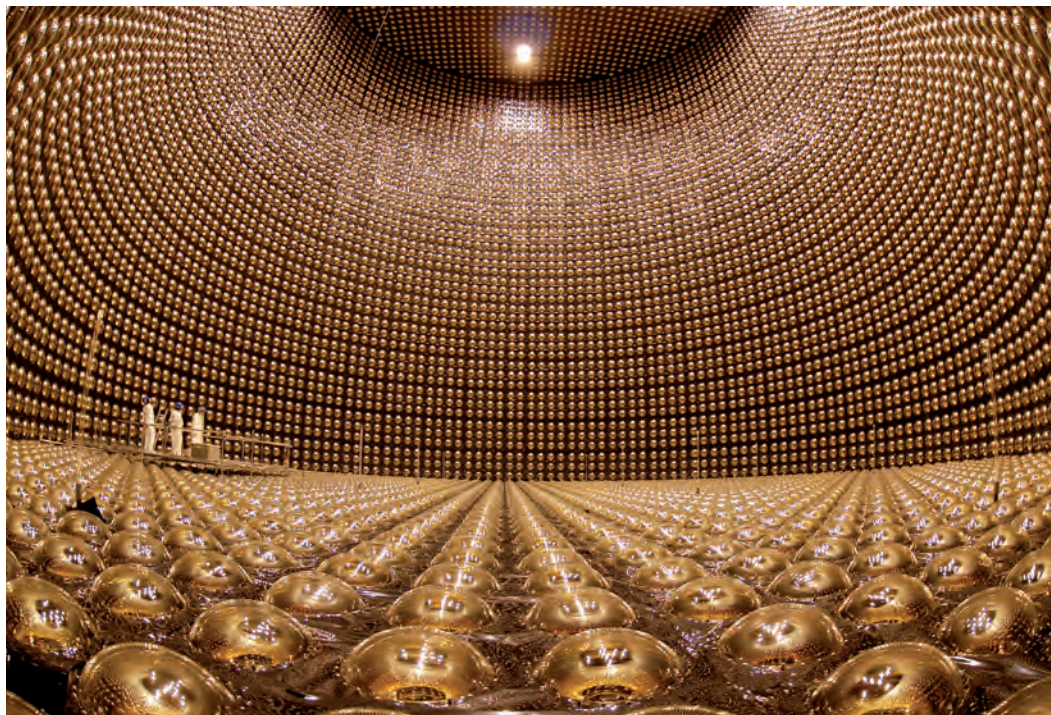
27, ndr) in un tempo troppo breve se confrontato con i limiti sperimentali, a meno che la loro massa non risulti superiore ai 10^{16} GeV. Ma il modello di Georgi-Glashow stesso ha difficoltà a giustificare un valore così alto.

Il settore scalare della teoria pone altrettanti problemi teorici. Che SU(5) sia rotta spontaneamente nelle simmetrie del modello standard può avvenire mediante il meccanismo della rottura spontanea che coinvolge le rappresentazioni del bosone di Higgs nella 5 (e nella 24). In particolare, sarebbe naturale attendersi una massa simile per tutte le componenti della 5, due delle quali coincidono con il bosone di Higgs del modello standard. Le altre tre, però, sono particelle “colorate” che, alla stregua dei bosoni di *gauge* supemassivi, possono rendere la vita media del protone troppo rapida, a meno che non siano esse stesse particelle supermassive. Il problema, allora, è quello di trovare un modo naturale per separare la massa del doppietto (intorno ai 100 GeV) da quella del tripletto (intorno a 10^{16} GeV). Nel modello minimale questo risultato è ottenuto al costo di un aggiustamento “fine” tremendo (diremmo “innaturale”) tra i parametri del potenziale dei campi di Higgs. L'uso della 5 di Higgs è anche utile per dare massa ai fermioni con un meccanismo analogo a quello del modello standard. Questi, però, predicono il rapporto tra la massa del quark down e quella del quark strange pari a un improbabile $1/207$ (da confrontarsi con il valore sperimentale pari a ca. $1/20$), per

cui è necessario ampliare il settore scalare introducendo, ad esempio, la rappresentazione 45 di Higgs. Questa, come la 5, contiene un doppietto che aiuta a sistemare le relazioni di massa sbagliate, ma anche dei tripletti colorati che, al solito, necessitano una massa molto elevata. Pur rappresentando una soluzione al problema delle masse, questo meccanismo complica ulteriormente il modello e richiede di assegnare ai parametri del modello dei valori calibrati *ad hoc*, rendendo il tutto molto meno naturale e attraente.

In definitiva, sebbene il modello originario di Georgi e Glashow soffra di importanti difetti, esso offre un prototipo di teoria Gut semplice ed elegante sulla quale innestare nuovi ingredienti capaci di risolvere (o alleviare) parte delle problematiche qui descritte. La supersimmetria (vd. in *Asimmetrie* n. 18 p. 13, ndr) e la formulazione di SU(5) in dimensioni spaziotemporali superiori a 4 forniscono delle possibili scappatoie, in quanto permettono una perfetta unificazione e predicono una vita media del protone più lunga dell'età dell'universo, come gli esperimenti suggeriscono che sia.

Il senso estetico per la bellezza delle teorie rappresenta una guida per molti fisici teorici, a cominciare da Einstein. Ma a volte, come nel caso della Gut SU(5) proposta da Georgi e Glashow, la natura ha dei gusti diversi da quelli dei fisici. O, forse, ha in serbo soluzioni ancora più belle, a cui nessuno ha ancora pensato.



b.
L'esperimento Superkamiokande, in Giappone, consiste in un'enorme cisterna situata in una miniera e contenente 50.000 tonnellate d'acqua. Questo isolamento, progettato per lo studio dei neutrini, permette anche di indagare meglio la vita media del protone.

Biografia

Davide Meloni è ricercatore del Dipartimento di Matematica e Fisica di Roma Tre. Si è laureato e dottorato in fisica presso l'Università La Sapienza di Roma. Ha coperto posizioni da *post-doc* a Granada (Spagna), Würzburg (Germania), Infn sezione di Roma 1 e Dipartimento di Fisica di Roma Tre.

[as] selfie

Arduino docet.

di Federica Camilli, Paola Mamone, Maria Gabriella Pulvirenti

docenti di matematica e fisica



L'avvento delle nuove tecnologie ha reso sempre più necessario un aggiornamento costante dei docenti, che permetta loro di attuare nuove modalità di insegnamento/apprendimento e di costruzione attiva e creativa della conoscenza, per sostenere gli studenti nell'interpretazione della realtà che li circonda. In questo contesto, dal 12 al 14 settembre presso il Fablab della fondazione Mondo Digitale di Roma, si è tenuta la prima edizione della "Scuola di Arduino e Smartphone", un corso di aggiornamento per docenti di materie scientifiche della scuola secondaria di secondo grado, promosso dal Dipartimento di Fisica della Sapienza Università di Roma nell'ambito del Piano Lauree Scientifiche (PLS), con la collaborazione dell'Infn. La prima giornata del corso è stata caratterizzata da lezioni e seminari che hanno illustrato le peculiarità e le potenzialità della scheda Arduino, dopo un'introduzione del prof. Alfonso Molina, direttore scientifico di Mondo Digitale, sulle attività della fondazione. Successivamente, il prof. Giovanni Organtini della Sapienza ha tenuto una lezione sull'apprendimento base della programmazione della scheda Arduino e, in conclusione di mattinata, Frederic Bouquet, professore presso l'Università di Paris-Sud, ha tenuto un seminario sull'uso di sensori e trasduttori per Arduino. La giornata si è quindi conclusa con il

seminario del prof. Tommaso Tabarelli de Fatis dell'Università Bicocca, in cui sono state illustrate le app di fisica utilizzabili con i sensori di uno smartphone. Nei due giorni seguenti, noi insegnanti siamo stati suddivisi in gruppi e ci siamo dedicati alla progettazione e realizzazione di esperimenti di fisica, utilizzando sia le risorse presenti nel Fablab, che materiali di uso comune di facile reperibilità in negozi di casalinghi. Abbiamo creato circuiti con Arduino e utilizzato il suo ambiente di programmazione, scaricando liberamente dal web schemi di funzionamento e librerie. Noi tre in particolare abbiamo realizzato un esperimento per lo studio del moto di un carrellino lungo un piano inclinato. Non è stato semplice apprendere e applicare le nozioni base del *coding* e, a volte, la realizzazione concreta di quanto progettato ha incontrato degli ostacoli che hanno frustrato le aspettative dei docenti. Ma il lavoro di gruppo e l'empatia diffusa hanno fatto superare tutti gli ostacoli e poi ... che soddisfazione illustrare il proprio progetto didattico! Quanto appreso con entusiasmo in questi tre giorni di *full-immersion* su Arduino e il suo mondo avrà naturalmente una positiva e proficua ricaduta nella didattica (laboratoriale) della fisica.

[as] radici

Errori di genio.

di Vincenzo Barone



Esistono le onde gravitazionali? Dopo la loro scoperta sperimentale, avvenuta l'anno scorso, la risposta è naturalmente affermativa e la domanda può apparire bizzarra. Ma per lungo tempo la questione è rimasta aperta anche sul piano teorico e i fisici hanno dibattuto davvero sull'esistenza delle onde gravitazionali. Perfino il loro "inventore", Albert Einstein, fu attraversato da qualche dubbio e rischiò a un certo punto di commettere uno sbaglio, negando la realtà del fenomeno.

Nel 1916, all'indomani della pubblicazione della sua fondamentale memoria sulla relatività generale, Einstein scoprì che le equazioni del campo gravitazionale, scritte in prima approssimazione, ammettevano soluzioni corrispondenti a onde dello spaziotempo prodotte da masse accelerate. La relatività generale, dunque, prevedeva che la gravità potesse propagarsi sotto forma di onde simili a quelle elettromagnetiche, viaggianti

alla velocità della luce. Lo status teorico di queste onde rimase però dubbio: alcuni, infatti, ritenevano che fossero un effetto spurio di particolari scelte delle coordinate spaziotemporali. L'illustre astrofisico britannico Arthur Eddington scrisse che le onde gravitazionali viaggiavano "alla velocità del pensiero" (dal momento che la loro velocità sembrava dipendere dal sistema di coordinate adottato) e pertanto non potevano rappresentare qualcosa di oggettivo. Einstein tornò sull'argomento nel 1936 e si convinse di aver dimostrato la non esistenza di soluzioni regolari di tipo ondulatorio delle sue equazioni. Spedì il lavoro che conteneva questo risultato - scritto con il suo collaboratore Nathan Rosen e intitolato interrogativamente "*Do Gravitational Waves Exist?*" ("Esistono le onde gravitazionali?") - alla *Physical Review*, la quale lo sottopose, come era già consuetudine a quel tempo, al giudizio di un

a.
Foto di gruppo all'Institute di Princeton per il settantesimo compleanno di Einstein. Howard P. Robertson è il primo a sinistra. Di seguito: Wigner, Weyl, Gödel, Rabi. Il penultimo a destra è Oppenheimer.

revisore anonimo. Questi diede parere negativo alla pubblicazione, segnalando un errore nel ragionamento. Einstein, abituato a pubblicare sulle riviste tedesche che non prevedevano la *peer review* (e che mai si sarebbero permesse di rigettare l'articolo di un insigne scienziato), si indispettì per la procedura. "Io e Rosen - scrisse all'*editor* della rivista, John Tate - le abbiamo inviato il nostro manoscritto per la pubblicazione e non l'abbiamo autorizzata a mostrarlo ad altri specialisti prima della stampa. Non vedo alcuna ragione per replicare ai commenti, comunque erronei, del vostro esperto. A causa di questo incidente preferisco pubblicare l'articolo altrove".

Ma il revisore - che, come ha scoperto il fisico e storico Daniel Kennefick, era Howard Percy Robertson, uno dei massimi specialisti di relatività generale e di cosmologia (noto per la metrica di Robertson-Walker, che descrive la geometria dell'universo su grande scala) - aveva ragione: le onde che a Einstein erano sembrate affette da singolarità e perciò non fisiche, erano in realtà regolari e pienamente valide. Einstein se ne accorse alla vigilia di

un seminario all'Institute di Princeton in cui avrebbe dovuto presentare la prova della non esistenza delle onde. Tenne ugualmente il seminario, illustrando il proprio errore e rinviando a nuove ricerche. Poco dopo, rifece assieme a Rosen i calcoli e ottenne una soluzione rigorosa delle equazioni del campo gravitazionale in forma di onde cilindriche. L'articolo, dal titolo non più interrogativo, "*On Gravitational Waves*", comparve su una rivista di secondo piano, il *Journal of the Franklin Institute*, perché il suo permaloso autore decise di interrompere definitivamente ogni rapporto con la *Physical Review*.

Einstein era consapevole del fatto che gli errori rappresentano una componente naturale e inevitabile del lavoro di ricerca e riteneva perciò che non dovessero generare particolari imbarazzi. A Leopold Infeld, che stava scrivendo assieme a lui il famoso saggio su "L'evoluzione della fisica" e che gli confessò di essere più attento del solito, visto che il libro avrebbe avuto il nome di Einstein in copertina, disse: "Non è il caso di essere così accorti. Ci sono anche lavori sbagliati con la mia firma".

c.
L'articolo sulle onde gravitazionali cilindriche pubblicato da Einstein e Rosen sul *Journal of the Franklin Institute*.

ON GRAVITATIONAL WAVES.

BY

A. EINSTEIN and N. ROSEN.

ABSTRACT.

The rigorous solution for cylindrical gravitational waves is given. For the convenience of the reader the theory of gravitational waves and their production, already known in principle, is given in the first part of this paper. After encountering relationships which cast doubt on the existence of *rigorous* solutions for undulatory gravitational fields, we investigate rigorously the case of cylindrical gravitational waves. It turns out that rigorous solutions exist and that the problem reduces to the usual cylindrical waves in euclidean space.

I. APPROXIMATE SOLUTION OF THE PROBLEM OF PLANE WAVES AND THE PRODUCTION OF GRAVITATIONAL WAVES.

It is well known that the approximate method of integration of the gravitational equations of the general relativity theory leads to the existence of gravitational waves. The method used is as follows: We start with the equations

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = -T_{\mu\nu}. \quad (1)$$

[as] intersezioni

Che tempo che fa.

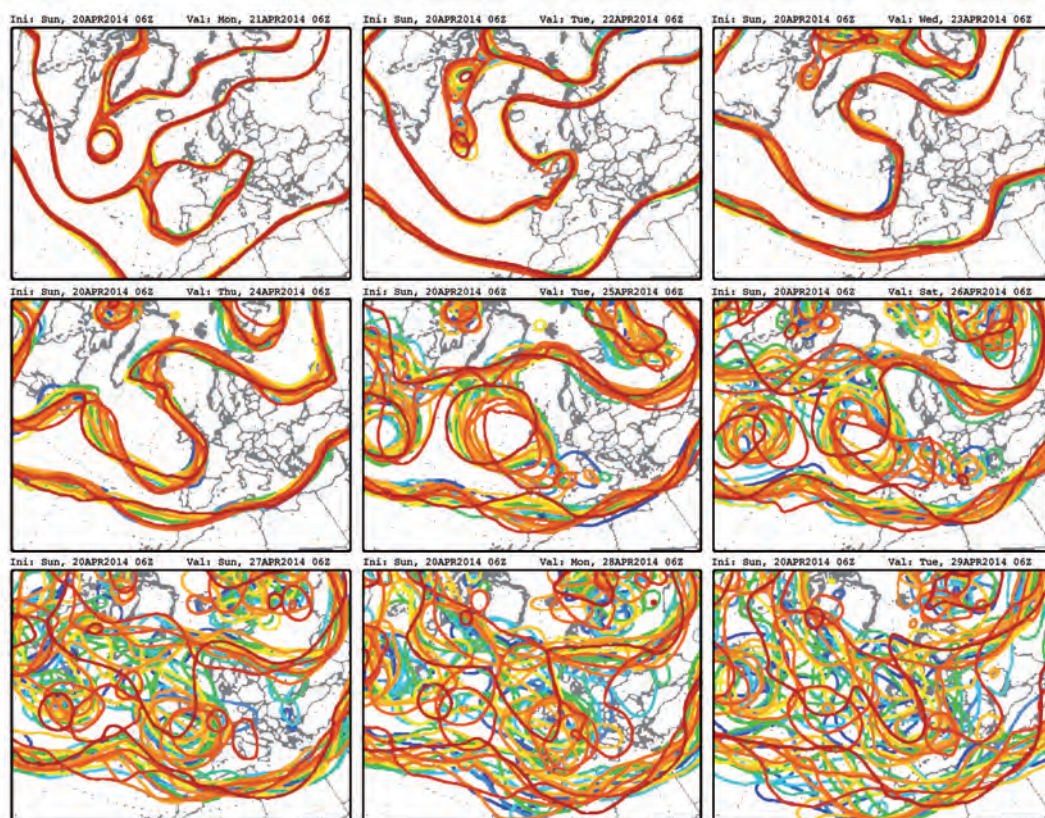
di Claudio Cassardo

docente di fisica, meteorologo, climatologo

Negli ultimi settant'anni la capacità di prevedere le condizioni meteorologiche è migliorata notevolmente, grazie soprattutto all'evoluzione dei sistemi osservativi, all'aumento della loro qualità e quantità e alla sempre maggiore affidabilità della modellistica meteorologica. Tuttavia, anche se il progresso delle conoscenze continuerà a ridurre gli errori della previsione, ci sarà sempre un ineludibile margine di incertezza dovuto alla natura non-lineare dell'atmosfera e alle sue interazioni "caotiche" con il resto della biosfera e degli oceani. L'atmosfera è un sistema la cui evoluzione temporale dipende fortemente dalle condizioni iniziali, e queste ultime, nonostante la gran mole di dati osservativi ora disponibili, non possono essere note con esattezza ovunque. Come esempio,

si pensi che ogni giorno confluiscono nei server dei centri meteorologici mondiali circa quarantamila dati osservativi relativi a stazioni meteorologiche poste a terra o sul mare, raccolti in media ogni ora o mezz'ora, e circa seicento profili verticali delle grandezze meteorologiche, condotti mediamente due volte al giorno. Un modello globale che funzioni alla risoluzione di un decimo di grado in latitudine e longitudine (grosso modo dieci chilometri, alle nostre latitudini) necessita di $180 \times 360 \times 100 = 6.480.000$ (sei milioni e mezzo!) valori a terra e su tutti i suoi livelli verticali. Si capisce dunque bene come la scelta dei valori iniziali sia necessariamente approssimata. Questi inevitabili errori di inizializzazione, a causa della non linearità del comportamento dell'atmosfera,





b. Esempio di spaghetti-plot (modello Gfs) del 20 aprile 2014 alle ore 06 Utc (tempo coordinato universale). Si noti come le curve tendono a sparpagliarsi giorno dopo giorno fino al 29 aprile, e anche come non in tutte le regioni le previsioni hanno lo stesso grado di attendibilità. È comunque chiaro che la significatività delle ultime tre mappe (e spesso anche delle tre centrali...) è assolutamente nulla e non consente alcun tipo di previsione oggettiva. In particolare, nei pressi della Groenlandia, già il giorno 22, ovvero due soli giorni dopo l'elaborazione del modello, si nota una significativa divergenza delle correnti, che genera posizioni e intensità dei minimi diverse tra le varie mappe.

si amplificano in breve tempo fino a rendere imprevedibile la sua evoluzione (o, il che vuol dire la stessa cosa, inaffidabile la soluzione del modello). Fu Edward Lorenz nel 1972 a dimostrare, con un semplice algoritmo numerico, tale proprietà del moto dei fluidi, in seguito battezzata "effetto farfalla". Nei modelli numerici, le equazioni vengono integrate nel tempo iterativamente, fino al termine dell'elaborazione del modello, usando uno *step* temporale in modo che il valore "futuro" di una variabile venga poi usato come nuovo valore "presente". Poiché i dati iniziali sono già affetti da un errore, e le funzioni di dati affetti da errore forniscono risultati affetti da errori generalmente crescenti, l'integrazione numerica di un'equazione fornisce un valore con un errore maggiore di quello di partenza. Se la crescita dell'errore fosse lineare, si potrebbe prevedere quando il risultato non è più rappresentativo. Ma poiché la crescita è non lineare, in determinate circostanze e situazioni meteorologiche, gli errori crescono molto rapidamente in breve tempo, rendendo inutile la conoscenza del valore previsto oltre un certo limite.

L'impossibilità di stabilire, *a priori*, l'esattezza di una previsione affidandosi a un'unica previsione deterministica, ha portato nell'ultimo ventennio allo sviluppo di una tecnica, nota con il nome di "*ensemble predictions*" ("previsioni di insieme"), in cui si integrano simultaneamente più stati dell'atmosfera, caratterizzati da condizioni iniziali poco diverse tra loro. Lo scenario previsto è legato alla frequenza con cui la configurazione atmosferica ricorre nell'insieme di tutte le previsioni. Da diversi anni i meteorologi usano le previsioni di insieme. Il ruolo degli esperti nell'interpretare le previsioni e spiegare i rischi correlati è cruciale, anche nell'epoca dei modelli numerici: per realizzare un centro o addirittura un servizio meteorologico non basta semplicemente mettere assieme i risultati dei modelli utilizzati da altri, senza persone qualificate che interpretino i risultati (ahimè, alcuni centri di questo tipo esistono davvero). Si possono trovare online degli esempi di questa tecnica: ad esempio, collegandosi al portale

tedesco wetterzentrale.de è possibile visualizzare le mappe di insieme del modello americano Gfs (disponibili gratuitamente) o anche del modello europeo Ifs del European Centre for Medium-Range Weather Forecasts di Reading (purtroppo non tutte fruibili gratuitamente, nonostante tutti i cittadini europei sovvenzionino tale centro). Tali mappe, che in gergo sono chiamate "spaghetti-plot" o anche "spaghi", mostrano la distribuzione di alcune curve previste dai membri dell'ensemble del modello sul continente europeo nel susseguirsi dei giorni di previsione (vd. fig. b), oppure di alcuni parametri sulla verticale di determinate località. La consultazione di queste risorse permette anche a chi è digiuno di conoscenze meteorologiche di capire da quale giorno le curve sono così sparpagliate da rendere inaffidabile la previsione (normalmente tra 3 e 5 giorni), e quindi di capire come le tanto decantate e usate app meteo rappresentino solo una sorta di giochino che, senza una valutazione di un esperto, fornisce spesso informazioni inattendibili, soprattutto su tempi lunghi.

[as] con altri occhi

Il gioco più bello del mondo.

di Sonia Bergamasco

attrice e regista



Quando il tram n.18 ci lascia al capolinea, ad accogliere ci c'è la bella struttura in legno del Globe. Io e la mia amica Laura Piazzi ci guardiamo attorno, indecise su dove dirigerci. Ci raggiunge in quel momento Paola Catapano, trafelata e sorridente. È lei, storica "colonna" dell'ufficio comunicazione del Cern di Ginevra, che ha coordinato il nostro arrivo e ha predisposto il fittissimo programma della nostra visita.

Sarà una due giorni di esplorazione ricca di appuntamenti: Guido Tonelli, già *spokesperson* di Cms, fisico di fama mondiale, sorridente, aperto, spiritoso, sarà il nostro Virgilio e ci guiderà nella "discesa al centro dei giochi". Beninteso, non c'è

nessun Dante da accompagnare, semplicemente due persone curiose, certe che quello che verrà man mano mostrato loro sarà qualcosa che le riguarda. E, in effetti, uno strano senso di familiarità mi accompagna attraverso le sale, malgrado lo sforzo continuo di attenzione alle descrizioni complesse e specialistiche del lavoro di fisici, ingegneri, informatici e tecnici. Mi sento bene, qui, sento che c'è una ricerca che poggia su elementi comuni anche al mio lavoro. Intuizione, pratica intensa, revisione continua. Dialogo, senso critico, passione. Quello che mi risulta chiaro, da subito, è che questa comunità internazionale - variopinta e trasversale - si è immaginata, progettata e costruita il gioco più bello del mondo. Il gioco, qui al Cern ha, secondo me, a che vedere con un'infanzia del pensiero capace di immaginare mondi e di avvicinarsi a un'idea di presente in continuo divenire: quella del gioco, appunto - roba seria, s'intende.

Contrapposta all'immagine del gioco "bambino", l'idea di universo proposta da Guido Tonelli è la seguente: il nostro è un universo vecchio, freddo, vuoto. Mi chiedo quale spazio ci sia in questo vuoto siderale per il mondo dei suoni, concepiti e percepiti dagli esseri umani. È una domanda insistente, la mia, da musicista. Non mi arrendo all'idea di uno spaziotempo privo di musica, non riesco a pensarlo. La musica, in verità, scorre impetuosa tra le righe del racconto di Guido Tonelli, ma anche di Ludovico Pontecorvo, coordinatore tecnico di Atlas, e di moltissimi "cittadini" della comunità del Cern. Musica ascoltata e praticata. Per le celebrazioni dei sessant'anni della fondazione del centro sono stati organizzati anche alcuni concerti in cui compositori e musicisti hanno dato vita a una "sonificazione" dei dati di rilevazione scientifica. Altri esperimenti artistico/musicali sono in corso e sono i benvenuti, qui al Cern.

La nostra visita prosegue attraverso i settori principali della grande struttura che si estende come un territorio carsico sopra e sotto terra, e per decine di chilometri, tra la Svizzera e la Francia. E di ora in ora l'immagine di un organismo vivente di enorme complessità si delinea con sempre maggiore chiarezza. La struttura direttiva, all'interno del centro, è chiara, ma non è chiaro come possano convivere anime così diverse e articolate all'interno di un'unica comunità, in un equilibrio che pare perfetto. Deve per forza trattarsi di un equilibrio instabile, come quello del funambolo sul filo. Un errore da niente e tutto è perduto.

Amo molto l'immagine dell'uomo sul filo. È la mia immagine guida quando entro in scena, l'unico modo per me di stare in rapporto con il racconto e con il pubblico. Un rapporto rischioso. Qui sento materializzarsi questa immagine, mentre scendiamo

“in caverna”, per arrivare alle soglie dell’“esperimento”, che non potremo vedere dal vivo perché il grande acceleratore è, in queste settimane, in piena attività e non è quindi accessibile. Cogliamo però, nelle gigantografie di dimensioni 1:1, realizzate per dare ai visitatori un’immagine concreta della struttura, l’idea di profonda armonia che governa l’esperimento. La struttura dei rivelatori Atlas e Cms sprigiona una carica quasi mistica, sono dei monumentali mandala, ai cui piedi migliaia di donne e di uomini innalzano la loro preghiera laica. Delle migliaia di scienziati al lavoro, i giovani costituiscono una parte importante, anzi fondamentale. Sono loro l’energia più esplosiva dell’“esperimento” Cern. I loro calcoli, le loro analisi e le loro domande costituiscono la materia prima essenziale per ogni nuovo passo della ricerca. E la proposta di un ventenne può mettere in crisi la riflessione decennale di un professore “affermato”. E, incredibilmente, al Cern, questa proposta

“giovane”, se ha le basi scientifiche per reggere al metodo sperimentale, verrà accolta e realizzata. Prendiamo nota tutti, si fa così: è possibile, è giusto, ed è anche vantaggioso. La nostra due giorni di “immersione” si chiude con un incontro informale con alcuni rappresentanti della comunità italiana, la seconda per numero all’interno del centro, e si dipana allegra e vivace attorno a un tavolo della sala mensa. Perché siete qui, ci chiedono. Che cosa cercate al Cern, da dove nasce il desiderio di conoscere questo luogo (luogo che è meta quotidiana di visite da parte di comunità di studenti, studiosi, curiosi, gente, provenienti da ogni parte del mondo). Sono consapevole del privilegio che mi è stato accordato, quando nel rispondere alle domande di un’intervista sulle pagine di “Io donna” (l’inserto settimanale del Corriere della Sera, ndr) esprimevo il mio (grande) desiderio. Eccolo esaudito, sono qui, al Cern. E ora? Che cosa ho trovato? Questo luogo che avevo immaginato,

che avevo anche sognato, di cui mi ero documentata e di cui avevo molto letto. Ecco la risposta: corrisponde all’immagine che me ne ero fatta. Aderisce alle pareti della mia stanzetta segreta. E questo mi rende felice. Le persone che vi lavorano, nei vari settori che concorrono al funzionamento di questo “organismo”, sono animate da una carica positiva che le rende speciali. Persone che amano profondamente il loro lavoro - sembra scontato, ma non lo è. Per giorni non mi abbandonerà un sorriso piccolo e persistente. Una luce. La certezza che c’è qualcosa di sacro nelle particelle di cui siamo fatti. E questa cosa è un bene condiviso.

c.
Sonia Bergamasco durante la sua visita al Cern, con Guido Tonelli (al centro) e Ludovico Pontecorvo (a destra).

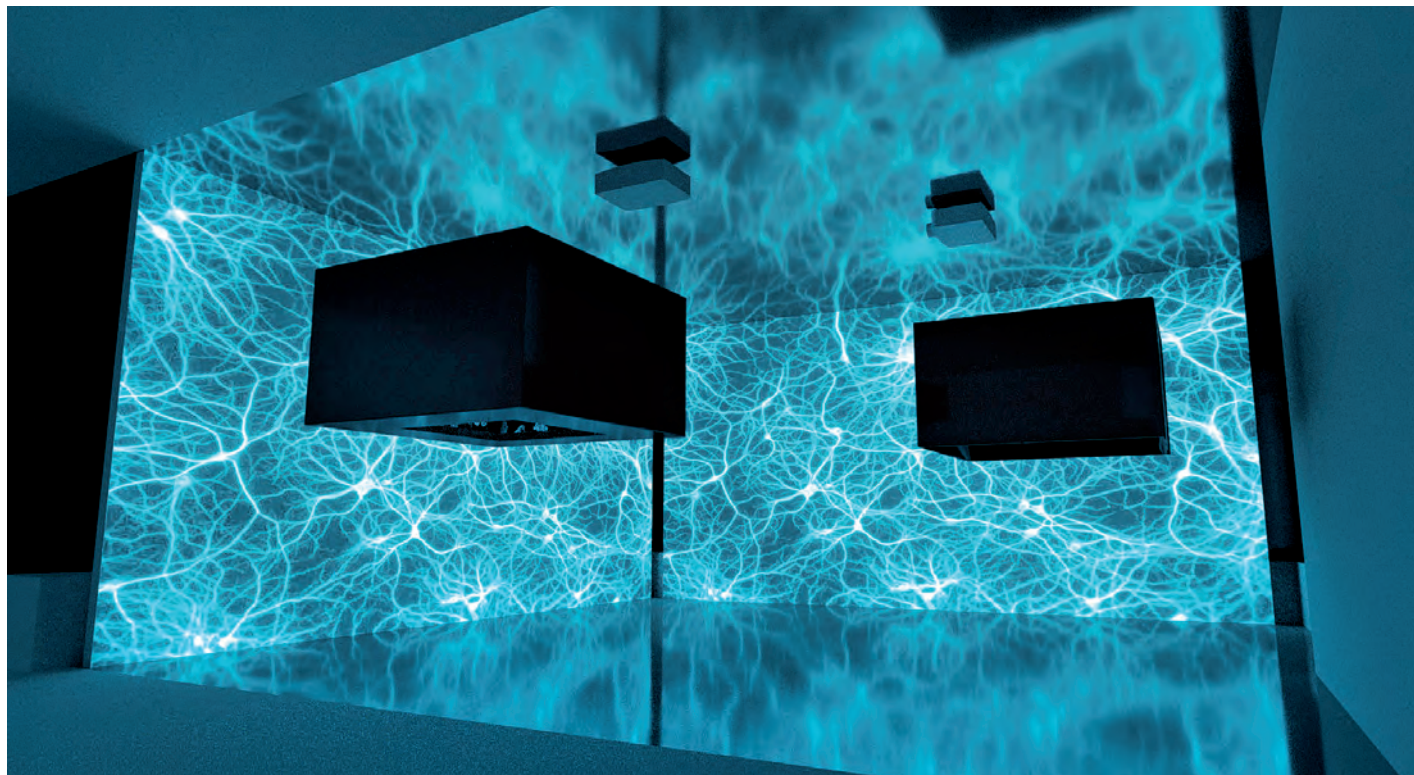


[as] spazi

Uomo Virtuale.

di Vincenzo Napolano

a.
L'installazione immersiva di chiusura della mostra, in cui il visitatore si perde in una foresta di neuroni.



Il nostro corpo è un mondo straordinario, che nasconde sorprese ed enigmi, al pari degli spazi cosmici più remoti o del nucleo infinitamente piccolo della materia. Abbiamo cominciato a studiarlo fin dall'antichità, per interpretare i sintomi delle malattie e curarle. Il primo vero trattato di anatomia umana, frutto di una scrupolosa e attenta disamina delle dissezioni di cadaveri, il *De Humani Corporis Fabrica* di Andrea Vesalio, risale però al 1542, lo stesso anno in cui Copernico pubblicava la teoria eliocentrica del sistema solare. Alcuni decenni più tardi, Galileo puntò verso il cielo il suo cannocchiale per trovare conferme del modello copernicano e negli stessi anni immaginò anche come costruire "un occhialino, che faceva grandi le cose piccole". Era il primo microscopio e l'esplorazione scientifica del nostro corpo e dei meccanismi alla base della

vita cominciava il suo cammino. Parte da qui il racconto della grande mostra "Uomo Virtuale. La fisica esplora il corpo", a cura dell'Infn e promossa dalla Fondazione Palazzo Blu di Pisa, dove è ospitata fino al 2 luglio 2017. La mostra racconta come, da sempre, le strade della medicina e dello studio della vita si siano incrociate con quelle della fisica, nella sua corsa a svelare i meccanismi fondamentali della materia e del cosmo. Con alcune tappe decisive. La prima è costituita dalle scoperte dei raggi X da parte di Wilhelm Roentgen e della radioattività grazie a Pierre e Marie Curie. Due scoperte che aprirono le porte allo studio dei nuclei atomici e produssero subito applicazioni mediche, prima di allora impensabili. Le radiografie, infatti, consentirono per la prima volta ai medici di guardare attraverso il corpo e di osservare al suo interno le ossa e

i tessuti opachi alle radiazioni. Quelle prime radiografie ci appaiono come gli antenati delle immagini digitali attraverso cui oggi osserviamo i più minuscoli dettagli degli organi e addirittura ne analizziamo dal vivo il funzionamento. Grazie ad esse abbiamo, infatti, realizzato "telescopi" e sonde sempre più sofisticati per guardare dentro di noi: la tomografia computerizzata, la Pet, l'ecografia, la risonanza magnetica... Tutti i segreti del mondo subatomico e subnucleare appresi dai fisici nel corso del '900 sono divenuti potenti tecnologie per affacciarsi su quell'universo misterioso che siamo noi stessi, restituendone anche una nuova bellezza virtuale. Immagini e panorami digitali del corpo, ma anche di elementi naturali, come piante, animali e minerali, sono infatti uno dei tessuti di scena di alcuni ambienti della mostra, in cui il visitatore si immerge nella scoperta della

trama invisibile della vita e degli strumenti con cui la sveliamo. Già Marie Curie, però, aveva utilizzato il potere della radioattività anche per curare: per distruggere con le radiazioni tessuti malati, in particolare i tumori. In seguito usando piccoli acceleratori di particelle per generare e indirizzare le radiazioni, i fisici e i medici hanno imparato sempre meglio a valutare l'effetto benefico e i possibili effetti collaterali di questa terapia. E così oggi, oltre alla pratica comune della radioterapia, è diventato realtà, anche in Italia, l'uso di grandi acceleratori di particelle, simili a quelli utilizzati per la ricerca, per bombardare i tumori con fasci di protoni o ioni e colpirli con estrema precisione. Perfette ricostruzioni virtuali di tutte le parti del nostro corpo ci consentono di curarci con strumenti e con tecnologie sempre più mirate ai nostri bisogni, ma non solo. Rendono possibile anche il sogno di integrare il nostro corpo con protesi artificiali che riescano a riprodurre le funzioni degli organi originali. Nella mostra si può comandare una mano artificiale attivata a distanza

da un ipad e indossare un visore che restituisce la visione prodotta da una retina artificiale. L'uomo virtuale ricostruito al computer potrebbe così diventare realtà, ma lo scoglio più arduo da superare è quello di collegare gli efficienti arti bionici al nostro cervello. E proprio alla incredibile complessità delle strutture e del funzionamento del cervello, la cui descrizione resta una delle sfide più avvincenti della ricerca contemporanea, la mostra dedica in chiusura un'installazione immersiva, che ha quasi il carattere di un sogno. Il visitatore si perde in una foresta di neuroni, che si moltiplicano in tutte le direzioni e si attivano al suo passaggio. In alcuni punti, poi, può affacciarsi su una dimensione ancora più piccola, come in un gioco di scatole cinesi, e osservare la vita e il funzionamento delle singole cellule, ricostruiti in ogni dettaglio dai microscopi a fluorescenza. Entrati in un neurone, come se fossimo organismi microscopici, siamo circondati da un paesaggio onirico e lunare di un altro mondo. Così lontano ci ha portato il viaggio dentro di noi.

[as] approfondimento

La mostra

"Uomo Virtuale" è stata realizzata con il supporto di Assobiomedica e in collaborazione con Università di Pisa, Scuola Normale Superiore, Scuola Superiore S. Anna, Cnr - Area di Ricerca e Istituto Nazionale di Ottica, Irccs Stella Maris e Associazione Nuova Limonaia. Sarà aperta al pubblico dal 22 marzo al 2 luglio a Palazzo Blu, Lungarno Gambacorti, 9, Pisa.

PER INFORMAZIONI E PRENOTAZIONI:

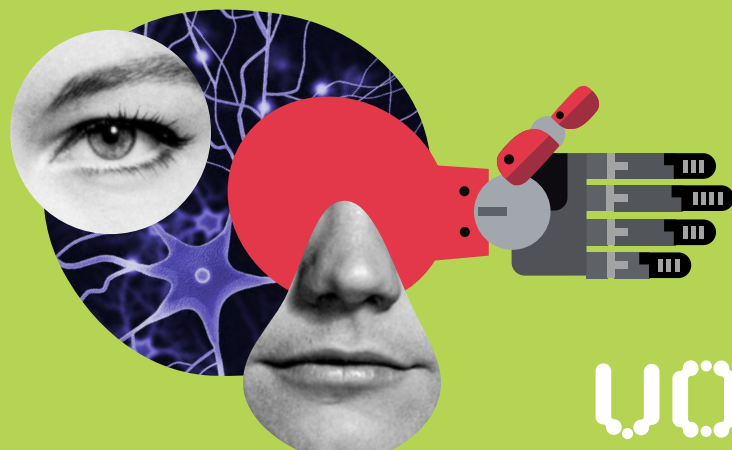
BLU | Palazzo d'arte e cultura
Tel. 050 22 04 650
Mail: info@palazzoblu.it
Facebook: <https://www.facebook.com/uomovirtuale.mostra/>

PER PRENOTARE VISITE GUIDATE:

Kinzica Società Cooperativa
Tel. 050 22 04 650
Mob. 377 16 72 424
Mail: info@kinzicacoop.it

PER PRENOTARE LABORATORI DIDATTICI:

La Nuova Limonaia
Associazione per la diffusione della cultura scientifica:
Tel. 050 22 14 861
Mail: info@lanuovalimonaia.it



Pisa, Palazzo Blu
22 marzo
2 luglio 2017

UOMO
virtuale
la fisica esplora il corpo

[as] traiettorie

Mettersi in gioco.

di Catia Peduto

“Ci piacciono i numeri, le conoscenze che regalano e quelle che esigono, ma soprattutto lo spirito di avventura e di pura bellezza che spesso sanno racchiudere”, si legge sul sito web della società torinese Taxi1729, fondata da tre ragazzi che si occupano di comunicazione e formazione scientifica. Abbiamo intervistato uno di loro, Diego Rizzuto.

[as]: Diego, dunque ti piacciono i numeri?

[Diego]: Mi piace mostrare che sono belli, prima che utili, questo è l'obiettivo che ci siamo dati in Taxi1729. Perché spesso i divulgatori di materie “dure”, come la matematica e la fisica, pongono l'accento sul fatto che queste sono utili “ad altro”. Ma è importante far scoprire il bello, prima dell'utile. E la matematica è bella, per davvero. Anche se io in realtà ho studiato fisica...

[as]: E come mai ad un certo punto hai lasciato la fisica e ti sei appassionato alla matematica?

[D]: Mi sono iscritto a fisica nel 1999 e dopo tre anni ho preso la laurea triennale, con una tesi sperimentale fatta all'interno del gruppo di Alice (uno degli esperimenti del Cern, ndr) dell'Infn di Torino. Poi ho iniziato il corso di laurea magistrale in fisica delle particelle e ho scoperto la mia passione per la comunicazione della scienza. In quel periodo, infatti, ho realizzato i miei primi video divulgativi: uno sulla fisica nucleare, proprio su incarico dell'Infn di Torino, l'altro sui possibili sbocchi professionali di un fisico, su incarico del Corso di Studi in Fisica dell'Università di Torino. Come lavoro di tesi magistrale ho poi progettato e realizzato, insieme a una società di Genova, un vero e proprio “videogame della fisica”.

[as]: Carina come idea!

[D]: Sì, era un'avventura grafica in cui Prot, il protagonista, si trova alle prese con il misterioso suicidio del suo amico, il fisico sperimentale Doc. Con i nomi non avevo avuto molta fantasia, ma la storia era avvincente: per nulla convinto che il suo amico si fosse davvero ucciso, infatti, Prot inizia a indagare e trova un messaggio video di Doc che è l'inizio di una vera e propria caccia al tesoro costellata di enigmi riguardanti la fisica, superati i quali Prot raccoglie indizi. Alla fine del gioco Prot raccoglie informazioni a sufficienza per capire che il suicidio in realtà era un omicidio e scoprire chi lo aveva commesso e perché: di mezzo, come è ovvio in un gioco come questo, si scopre esserci una società cattivissima con grandi interessi in una rivoluzionaria scoperta scientifica che aveva fatto Doc. Ma poi, dopo aver presentato questo lavoro davanti alla



commissione di laurea, qualche mese prima della discussione della tesi, ho lasciato il percorso universitario: ormai era chiaro cosa volevo fare “da grande”. Così ho aperto una partita Iva e mi sono buttato nel mondo dell'imprenditoria, con molto entusiasmo e nessuna esperienza, e, qualche anno dopo, ho fondato assieme ad altri due soci Taxi1729 (la storia di questo curioso nome è raccontata sul sito www.taxi1729.it, ndr).

[as]: In che consiste il vostro lavoro di divulgazione scientifica in Taxi1729?

[D]: Cerchiamo di raccontare la scienza in modo approfondito ma divertente. Miriamo a essere autorevoli senza essere noiosi. E non è un processo banale: per non banalizzare

concetti complessi, passiamo giorni a studiare e discutere tra noi. Per essere coinvolgenti, passiamo altrettanti giorni a ragionare su come raccontare quei contenuti, con quali parole e quali strumenti di supporto. Inoltre, prediligiamo progetti che abbiano un'utilità sociale, anche più immediata di quella legata alla semplice diffusione della cultura scientifica. Negli anni abbiamo declinato questa idea di divulgazione in conferenze, mostre, laboratori, corsi di formazione e, recentemente, in un libro ("Fate il Nostro gioco", Add Editore). Sembra proprio, almeno fino a oggi, che questa idea d'impresa sia economicamente sostenibile. Incredibile ma vero!

[as]: Raccontaci un po' meglio uno dei vostri progetti...

[D]: Non inventiamo un progetto all'anno, neanche uno ogni due anni: non fosse già stato fatto negli Stati Uniti, avremmo

brevettato noi il marchio "Slow science". Il primo progetto di Taxi1729, "Fate il nostro gioco", è nato nel 2009: una campagna d'informazione sulla matematica del gioco d'azzardo, tutt'oggi in piena attività. "Fate il nostro gioco" nasce da un obiettivo e da una precisa convinzione. L'obiettivo è svelare le regole, i piccoli segreti e le grandi verità che stanno dietro all'immenso fenomeno del gioco d'azzardo in Italia. La convinzione è che il modo migliore per farlo sia usare la matematica come una specie di antidoto logico, per creare consapevolezza intorno al gioco e svelare i suoi lati nascosti.

[as]: Insomma, svelate al pubblico perché è sbagliato cadere nella trappola dei giochi d'azzardo?

[D]: Esattamente! Abbiamo tenuto la nostra prima conferenza su questo tema nel 2010, a Torino. Da allora abbiamo coinvolto quasi 120.000 persone, perlopiù studenti, in 18 delle

20 regioni d'Italia (ci mancano Sardegna e Abruzzo!), ma anche in Svizzera e in Francia. Abbiamo realizzato video che hanno avuto milioni di visualizzazioni sui social e, difficile immaginarlo prima, siamo stati ospiti di trasmissioni importanti della tv nazionale e hanno parlato di noi le principali testate giornalistiche italiane. Recentissimo, poi, è il premio che ci è stato consegnato a novembre 2016, sul palco del Teatro Argentina di Roma, dall'Unione Nazionale Consumatori. Una serie di belle soddisfazioni, insomma. Almeno fin qua. Il sogno, però, sarebbe quello di tornare a parlare di fisica nella speranza che i miei soci - soprattutto il matematico - siano d'accordo.

b.
Diego Rizzuto (a destra) con il suo collega matematico Paolo Canova durante una lezione di probabilità, tenuta agli studenti del Liceo Classico Gioberti di Torino nel 2013.



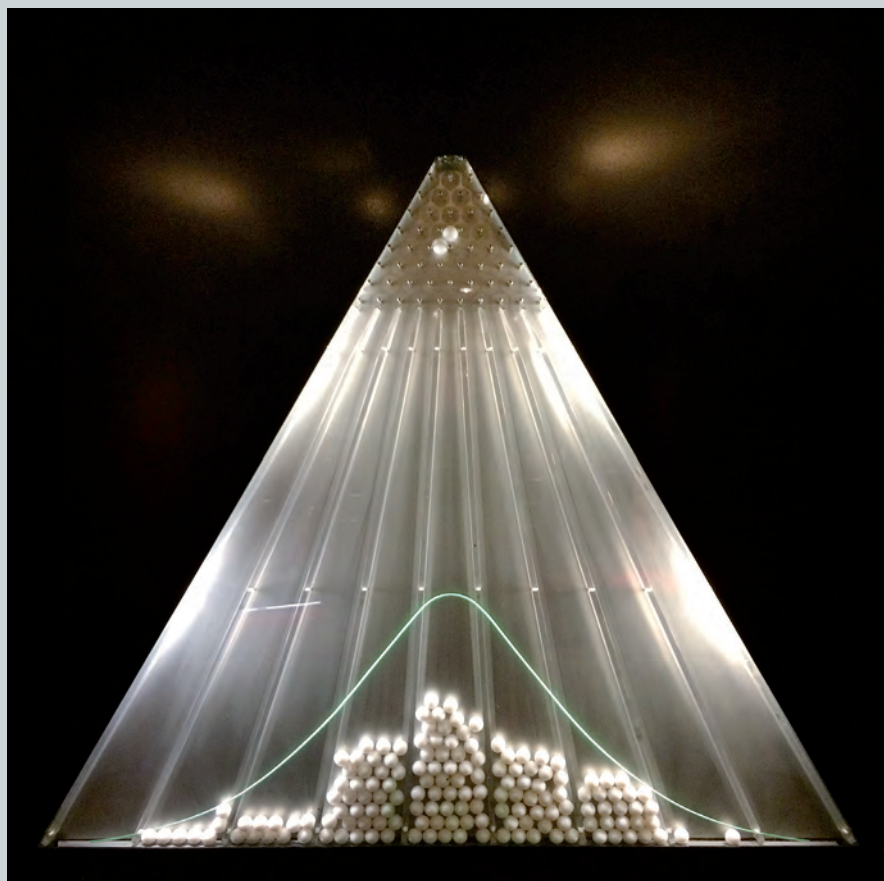
Testa o croce?

“Facciamo a testa o croce?” è la classica frase detta quando non abbiamo validi motivi per scegliere tra due opzioni ugualmente valide... ci affidiamo al caso. Non possiamo sapere prima - a meno che la moneta non sia truccata - se uscirà testa oppure croce. Eppure se lanciamo la moneta 100 volte invece di una sola “ci aspettiamo” che 50 volte esca testa e 50 croce. Se qualcuno ci ha mai provato veramente avrà trovato 51 testa e 49 croce, o 42 e 58, o magari 66 testa e 34 croce. La probabilità di quest'ultimo risultato è appena dell'1

per cento. Come facciamo a saperlo? Lo sappiamo perché si può calcolare e perché per farlo si può usare una delle curve più studiate: la distribuzione di Gauss, normale, a campana, o gaussiana (vd. approfondimento a p. 14, ndr).

Tra le tante proprietà utili e interessanti di questa curva c'è che può essere costruita. Verso la fine dell'800 Francis Galton, cugino del più famoso Charles Darwin, ideò una macchina che permetteva di impilare delle palline in modo che la sommità delle varie pile disegnasse una gaussiana. Galton

chiamò la macchina “*quinconce*” dal latino *quinque*, cinque, visto che l'elemento chiave della macchina è posizionare file di chiodini equispaziati, con ogni fila successiva spostata di metà della distanza tra due chiodi così da riprodurre la struttura dei punti sulla faccia del cinque del dado da gioco. Nella sua opera *Natural Inheritance*, Galton afferma di aver usato la macchina da lui ideata proprio per mostrare come generare sperimentalmente una curva gaussiana. È a quest'idea che si è ispirato il professor Domenico Liguori del Liceo Scientifico “Stefano Patrizi” di Cariati (CS), preparando un percorso didattico di approccio al trattamento statistico dei dati, descritto in un articolo pubblicato su “La Fisica nella Scuola” (la rivista dell'Associazione per l'Insegnamento della Fisica - Aif). Dopo una breve introduzione teorica, Liguori descrive come costruire il *quinconce*, alcuni semplici accorgimenti sperimentali per la buona riuscita e infine i risultati delle misure fatte dai suoi studenti. La semplicità e l'economia di realizzazione, possibile agli studenti stessi, e la varietà di risultati ottenibili, rappresenta una proposta percorribile ed efficace per ovviare alla diffusa ignoranza anche delle basi più elementari della statistica, scienza alla base di molti aspetti della vita moderna - dai sondaggi alle ricerche fondamentali, come quella del bosone di Higgs e della nuova fisica. Può forse sembrare strano ai non esperti, ma una buona comprensione delle proprietà della curva di Gauss è quasi tutto quello che occorre per il trattamento statistico dei risultati dei grandi esperimenti del Cern (anche se senza un buon computer sarebbe difficile produrre risultati in un tempo ragionevole). [Barbara Sciascia]



**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



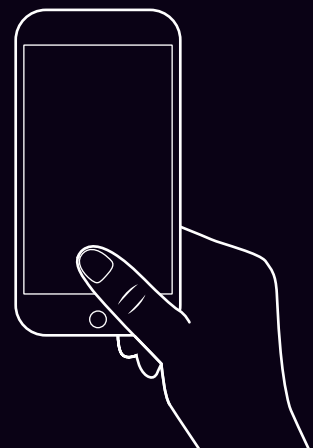
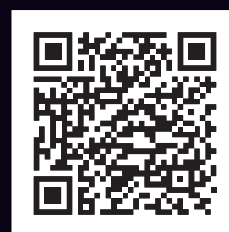
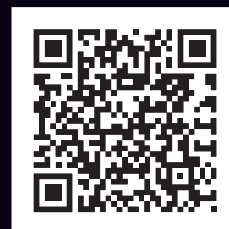
Sul sito **www.asimmetrie.it**
vengono pubblicate periodicamente
notizie di attualità scientifica.

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

Si prega di tenere sempre aggiornato il proprio
indirizzo mail per ricevere le nostre comunicazioni.

Leggi anche le nostre **faq** su:
<http://www.asimmetrie.it/index.php/faq>

Asimmetrie è anche una app,
ricca di contenuti multimediali.





www.infn.it

rivista online
www.asimmetrie.it