

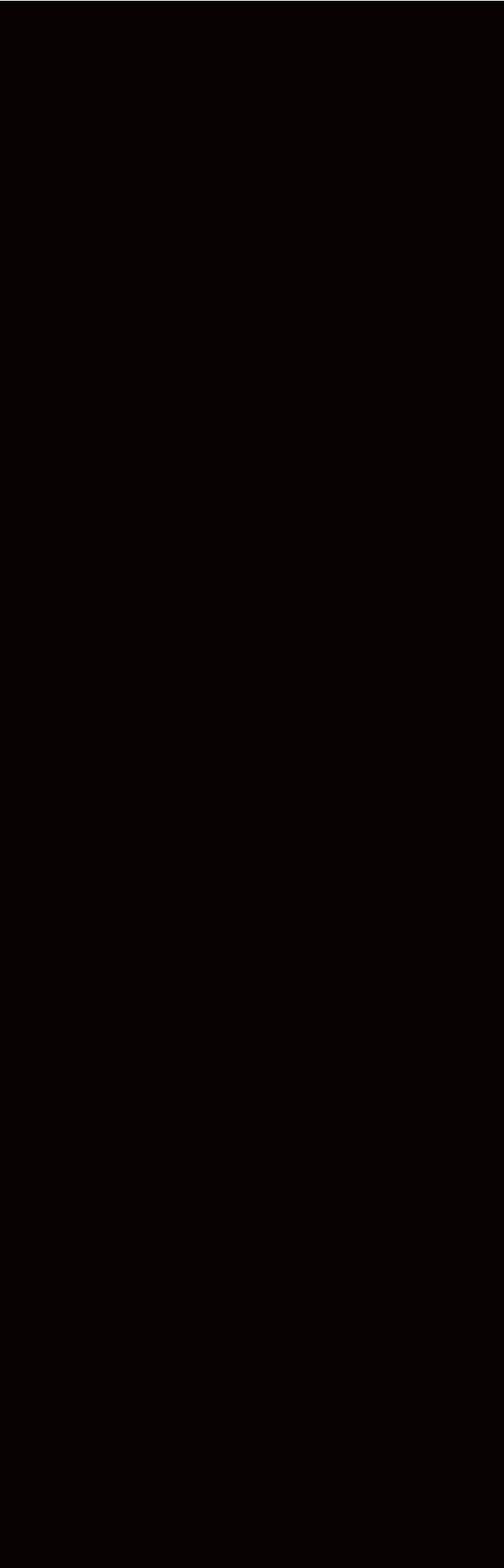


[#nuovafisica]

anno 10 numero **18** / 4.15

asimmetrie

rivista semestrale dell'Istituto
Nazionale di Fisica Nucleare



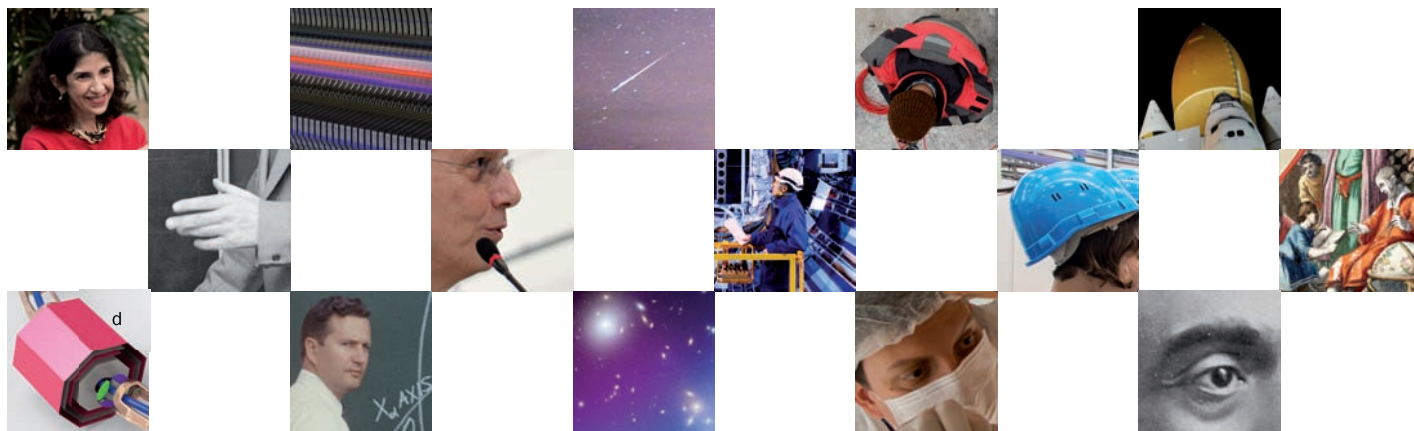
asimmetrie

Cari lettori di Asimmetrie,

La scoperta del bosone di Higgs arriva alla fine di un lungo cammino, dove una direzione era segnata, ma la strada andava costruita. Cinquant'anni di sforzi e, alla fine, grazie a una serie di tecnologie innovative e una visione lucida, arriva l'acceleratore Lhc e la tanto attesa scoperta. E ora? Ora ci siamo affacciati su un mondo che non conosciamo, dove le strade mancano, ma anche le direzioni da seguire sono poco evidenti. Certo sappiamo che qualcosa, anzi che moltissimo, c'è. La materia oscura sta lì con i suoi effetti gravitazionali assai evidenti. C'è addirittura chi sostiene che l'estinzione dei dinosauri sia dovuta ai suoi effetti. La velocità di espansione dell'universo, che aumenta con il passare di miliardi di anni e che noi, in assenza di una qualsiasi spiegazione, attribuiamo a una misteriosa energia oscura, è un altro enigma tutto da svelare. Nel mondo delle particelle tradizionali, invece, il neutrino, con la sua massa e la sua natura incerta, aspetta di essere collocato in un modello che non è quello standard che gli attribuiva proprietà diverse. E cosa facciamo noi per sondare questo mondo ignoto? Che direzioni prendiamo e che strade costruiamo? Per la materia oscura la ricerca si affida al futuro di Lhc a più alta energia, alla caccia delle sue interazioni nel silenzio dei rivelatori sotterranei e ai segnali osservati dai satelliti che scrutano l'universo. Lo studio dell'energia oscura, assai meno avanzato, si affida a telescopi terrestri o su satelliti, che ci dicano almeno se questa accelerazione continua è sempre stata presente o se varia con il tempo. Per i neutrini e i loro studi sono in costruzione raffinatissimi esperimenti, che opereranno al riparo dal disturbo dei raggi cosmici, ad esempio, nelle viscere del Gran Sasso o in alcune miniere, e osservatori nelle profondità del mare o dei ghiacci. Con pazienza e metodo sfruttiamo la tecnologia per far progredire la scienza, in un connubio virtuoso e duraturo.

Buona lettura.

Fernando Ferroni
presidente Infn



asimmetrie

Rivista dell'Istituto Nazionale
di Fisica Nucleare

Semestrale, anno 10,
numero 18 aprile 2015

direttore responsabile

Fernando Ferroni, *presidente Infn*

direttore comitato scientifico

Egidio Longo

comitato scientifico

Vincenzo Barone
Massimo Pietroni
Giorgio Riccobene
Barbara Sciascia

caporedattore

Catia Peduto

redazione

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

hanno collaborato

Guido Altarelli, Luca Amendola, Elisa
Bernardini, Gianfranco Bertone, Bruna
Bertucci, Marco Ciuchini, Daniele Del
Re, Giuseppe Giuliani, Carlo Giunti,
Mark Levinson, Andrea Romanino,
Marco Serone, Kip Thorne

contatti redazione

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

impaginazione

Istituto Arti Grafiche Mengarelli

stampa

IAG Mengarelli

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

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

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

Finita di stampare nel mese di aprile 2015.
Tiratura 20.000 copie.

come abbonarsi

L'abbonamento è gratuito.
Tre modi per abbonarsi:

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

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

Contattare la redazione

sito internet

Asimmetrie 18 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 (Synergee)
// foto p. 4 ©istockphoto.com (Mayakova);
foto a p. 5 ©CERN; figg. b,c pp. 6,8
©Asimmetrie-Infn; foto d p. 9 ©CERN // foto p.
10 ©GettyImages; foto a p. 12 ©Barbara
Sciascia // fig. a p. 13 ©Asimmetrie-Infn; fig. b
p. 14 ©CERN // foto a p. 15 ©CERN; fig. b p.
16 ©Asimmetrie-Infn // foto a p. 17 ©Mark
Levinson; foto b p. 18 ©CERN // fig. a p. 19
©Asimmetrie-Infn; foto b p. 20 ©Courtesy
Fermilab Visual Media Services; figg. c, d pp.
21, 22 ©Asimmetrie-Infn // foto p. 23 ©Asg
Superconductors // foto a p. 24 ©Mike
Lewinski; fig. b p. 25 ©Asimmetrie-Infn // foto
a p. 26 ©Nasa; foto b p. 27 ©Infn; foto c p. 28
©Michele Famiglietti-widlab.com per AMS
Collaboration; fig. 1 p. 29 ©Asimmetrie-Infn //
fig. b p. 31 ©Asimmetrie-Infn; foto c p. 32
©ESA // foto a p. 33 ©CERN // foto a p. 34
©Photo courtesy Los Alamos National
Laboratory; foto 1 p. 35 ©JINR; fig. b p. 36
©Asimmetrie-Infn; foto c p. 37 ©INFN // fig. a
p. 38 ©NASA/JPL-Caltech; foto 1 p. 39
©Vladimir Aynutdinov; fig. b p. 40
©Asimmetrie-Infn; foto c p. 41 ©Felipe
Pedreros. IceCube/NSF // foto a p. 42
©Depositphotos.com (Alenavlad); fig. b p. 43
©Andrew J. Hanson // fig. a p. 45
©Asimmetrie-Infn; foto b p. 45 ©Lynda Obst //
foto a p. 46 ©Archivio Alinari, Firenze; foto b p.
47 ©Landesmuseum für Technik und Arbeit in
Mannheim.

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

as

18 / 4.15

[#nuovafisica]

Oggi è già domani di Guido Altarelli	4	... che muove il Sole e l'altre stelle di Luca Amendola	30
Su e giù per le scale di Marco Ciuchini	10	[as] spazi Il Cern fa scuola. di Catia Peduto	33
Il mondo con la esse davanti di Andrea Romanino	13	Misteri sfuggenti di Carlo Giunti	34
Cercasi Susy disperatamente di Daniele Del Re	15	On the rocks di Elisa Bernardini	38
[as] con altri occhi Febbre da particelle. di Mark Levinson	17	Accordi fondamentali di Marco Serone	42
Una buona spinta di Lucio Rossi	19	[as] intersezioni Loro siamo noi. di Kip Thorne	44
[as] riflessi Magnet per il futuro. di Eleonora Cossi	23	[as] radici Il nuovo, cent'anni fa. di Giuseppe Giuliani	46
Dietro le quinte dell'universo di Gianfranco Bertone	24	[as] illuminazioni A portata di clic.	48
Notizie dalla stazione spaziale di Bruna Bertucci	26		

Oggi è già domani

La fisica dopo il bosone di Higgs

di Guido Altarelli





Dopo la prima fase degli esperimenti al Large Hadron Collider (Lhc) del Cern, la fisica delle particelle si trova dinanzi a un paradosso. Da una parte la teoria delle interazioni forti ed elettrodeboli, il cosiddetto *modello standard*, ha ottenuto dei successi strepitosi, come la scoperta del bosone di Higgs, il superamento di test di precisione di ogni tipo ecc. Dall'altra parte, forti motivazioni teoriche (principalmente il *problema della gerarchia o della naturalezza*, vd. anche in Asimmetrie n. 8 p. 11, ndr) ed evidenti problemi sperimentali (per esempio la natura della materia oscura) ci dicono che il modello standard non è una teoria del tutto completa e che, in realtà, segnali di una *nuova fisica* avrebbero già dovuto apparire negli esperimenti agli acceleratori. I paradossi sono sempre molto interessanti, perché dalla loro soluzione si può arrivare a una vera svolta nello sviluppo delle teorie fisiche.

Completato con il bosone di Higgs, il modello standard è una teoria perfettamente funzionante: è infatti *rinormalizzabile*, il che significa che, dopo un numero finito di misure sperimentali, la teoria è ben "calibrata" e può essere utilizzata per prevedere il risultato di

qualunque altra misura, in linea di principio, senza ambiguità, fino ad altissime energie. Quanto alle sorti del nostro universo, si trova che, nell'ipotesi di validità completa del modello standard, esso si mantiene *metastabile*: potrebbe collassare in un nuovo stato completamente diverso dall'attuale, ma, fortunatamente, la probabilità che ciò avvenga in un tempo paragonabile all'età dell'universo è praticamente nulla (vd. approfondimento in Asimmetrie n. 14 p. 24, ndr).

Dato che decenni di esperimenti agli acceleratori hanno sempre ribadito la validità del modello standard, perché si continua a invocare una nuova fisica? Innanzitutto, perché ci sono delle evidenze sperimentali molto impressionanti che vengono "dal cielo", ovvero dall'astrofisica e dalla cosmologia: quasi tutta la densità di energia dell'universo è sotto forma di energia del vuoto (circa il 73%), descrivibile in termini di una costante cosmologica non nulla chiamata *energia oscura* (vd. p. 30, ndr) e di materia oscura (circa il 22%, vd. p. 24, ndr), né l'una né l'altra contenute nel modello standard. Inoltre il modello standard non rende ragione delle proprietà dei neutrini (masse e mescolamenti)

a.
Il 4 luglio del 2012, Rolf Heuer (direttore del Cern), Fabiola Gianotti (all'epoca responsabile dell'esperimento Atlas, oggi direttrice designata del Cern) e Joe Incandela (responsabile dell'esperimento Cms in quel periodo) danno la notizia della scoperta del bosone di Higgs, che sancisce il successo del modello standard delle particelle.



b.

Le caselle in questo schema simile al “gioco dell’oca” rappresentano le diverse scale di energia (in blu) e le corrispondenti scale di lunghezza (in arancione). La corrispondenza tra energia, espressa in elettronvolt, e lunghezza, espressa in metri, è data dalla relazione $E(\text{eV}) \sim 2 \times 10^{-7} / L(\text{m})$, cosicché piccole distanze corrispondono a grandi energie e viceversa. Sono riportate le masse delle particelle del modello standard già note (elettrone, muone, tau, vari tipi di quark, neutrini, bosone di Higgs...), quelle di altre particelle ancora ipotetiche (assioni, neutrini sterili...) e le energie caratteristiche di alcuni fenomeni fisici osservati o raggiungibili negli acceleratori di particelle.

(vd. p. 34, ndr) che, come si è stabilito, hanno una massa non nulla (almeno due di essi), sebbene molto più piccola di quella dei quark e dei leptoni carichi. E poi, il modello standard non può spiegare la *bariogenesi*, ossia la predominanza della materia sull’antimateria nell’universo (vd. p. 26, ndr). Ci sono poi dei problemi concettuali che “invocano” una nuova fisica. Tra questi, ricordiamo che l’interazione gravitazionale (la gravità nel linguaggio comune) è fuori dal modello standard e che il problema della teoria quantistica della gravitazione rimane aperto (potrebbe emergere una soluzione dalla teoria delle stringhe, vd. p. 42, ndr).

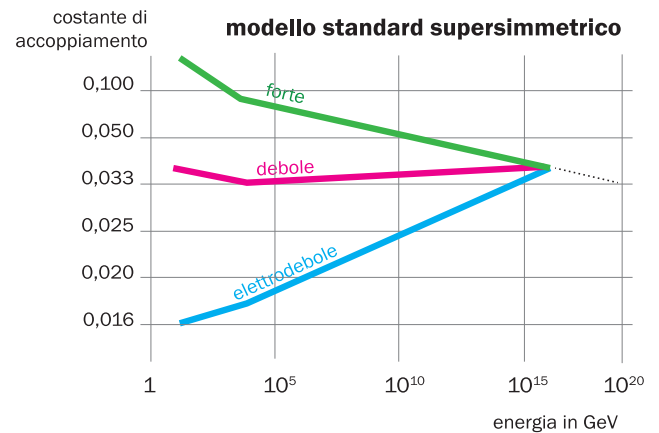
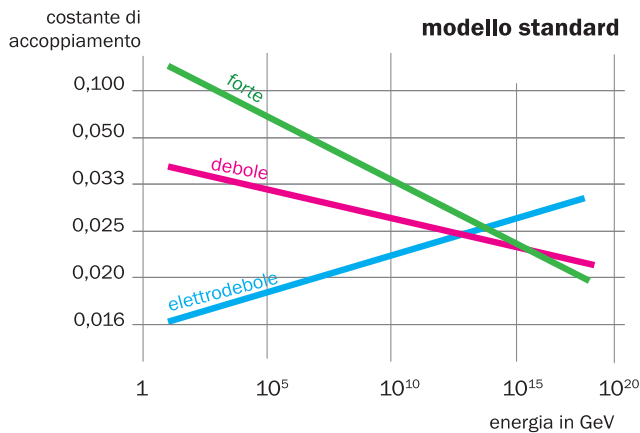
Gli effetti quantistici della gravitazione diventano apprezzabili solo a energie enormemente maggiori rispetto a quelle esplorate in Lhc (dell’ordine di 10 TeV, ossia 10^4 GeV, vd. anche in Asimmetrie n. 14 l’approfondimento a p. 8, ndr) e cioè alla cosiddetta *scala di Planck*, dell’ordine di 10^{19} GeV. Estrapolando le teorie note a scale un po’ inferiori, ma comunque sempre molto al di là del limite sperimentale attuale, si ottiene un indizio molto suggestivo sul comportamento della nuova fisica. Infatti, l’evoluzione (calcolabile) delle *costanti di accoppiamento di gauge* (i parametri che determinano l’intensità delle diverse interazioni fondamentali) in funzione della scala di energia indica che queste tendono ad assumere lo stesso valore alla scala della grande unificazione (10^{15} GeV): questo comportamento è previsto dalle *teorie di grande unificazione* (in inglese, *grand unification theories* abbreviato con Gut), in cui le tre interazioni esistenti alle “basse” energie studiate in Lhc (forte, debole ed elettromagnetica) si fondono in un’unica interazione fondamentale a una scala di energia molto maggiore (vd. fig. c a p. 8). L’unificazione a una stessa scala è però solo approssimata nel modello standard e, inoltre, potrebbe portare a un decadimento del protone troppo veloce rispetto ai limiti sperimentali esistenti. Entrambi questi problemi potrebbero essere risolti se esistesse una nuova fisica, ovvero una teoria che va oltre il modello standard, a scale di energia al di sotto di quella della grande unificazione.

Per molti dei problemi del modello standard si può rinviare la soluzione a una teoria più fondamentale (di cui il modello standard sia il limite di bassa energia, vd. p. 10, ndr), magari a una teoria alla scala di Planck, che includa anche l’interazione gravitazionale nell’unificazione. Per esempio, la soluzione del *problema del sapore*, ovvero la spiegazione delle tre generazioni di quark e leptoni e delle misteriose gerarchie tra

le loro masse (vd. in Asimmetrie n. 11 p. 20, ndr), potrebbe non essere accessibile a bassa energia.

Ma ci sono problemi del modello standard che richiedono (come il problema della gerarchia) oppure suggeriscono (come la materia oscura) una soluzione in prossimità della scala elettrodebole. Il problema della gerarchia consiste nel fatto che, nel modello standard, il valore della massa del bosone di Higgs dipende in modo molto pronunciato dai valori delle masse di eventuali nuove particelle esistenti a scale più elevate. In altre parole, in presenza di questa gerarchia delle masse, il valore misurato della massa del bosone di Higgs (pari a 125 GeV) sarebbe il risultato di una cancellazione tra termini che potrebbero essere molto più grandi, dovuti all’accoppiamento tra il bosone di Higgs e alcune nuove particelle. Perché questo meccanismo sia “naturale”, occorre che queste nuove particelle non siano troppo pesanti, ovvero che i termini indotti dal loro accoppiamento con il bosone di Higgs non eccedano di molto il valore osservato della massa di quest’ultimo. Per cui, per poter estrapolare la teoria fino alla scala della grande unificazione o a quella di Planck, senza dover “invocare” una calibrazione troppo accurata e innaturale (in inglese, *fine tuning*) di queste cancellazioni (vd. Asimmetrie n. 8 p. 11, ndr), bisogna estendere la teoria introducendo nuove particelle che abbiano una massa non troppo lontana dalla scala elettrodebole. Lo schema teorico più studiato è quello della *supersimmetria* (o *Susy*, dall’inglese SUpER SYMmetry), una simmetria tra bosoni e fermioni, secondo cui a ogni particella nota del modello standard è associato un corrispondente *partner supersimmetrico* o *s-partner* (vd. p. 13, ndr).

La dipendenza dalle scale alte si cancella per energie più alte delle masse delle particelle supersimmetriche (o almeno di alcune di esse) e il modello standard così esteso (come per esempio quello chiamato *modello standard supersimmetrico minimale*) è insensibile alla presenza di particelle ancora più pesanti, risolvendo perciò il problema della gerarchia. Inoltre, se la supersimmetria fosse una simmetria esatta, gli s-partner avrebbero esattamente la stessa massa delle corrispondenti particelle del modello standard, ma, dato che nessuno di questi nuovi oggetti è mai stato osservato, dobbiamo concludere che essi hanno una massa maggiore, il che richiede che la supersimmetria sia una simmetria solo approssimata o, in gergo, *rotta* (vd. in Asimmetrie n. 16 p. 27, ndr). Però, per risolvere il problema della gerarchia soddisfacendo alla richiesta di “naturalità”, gli s-partner non devono essere



troppo più pesanti delle particelle del modello standard. Per questo motivo molti si aspettavano una nuova fisica alla scala del TeV e quindi accessibile a Lhc (e addirittura al Lep2, il Large Electron-Positron collider che è stato in funzione al Cern fino al 2000). Oggi, i dati ottenuti sia dalla ricerca di nuove particelle che dalla esplorazione di possibili loro effetti virtuali ci impongono un grande livello di *fine-tuning*. La natura non sembra curarsi troppo del nostro concetto di “naturalzza”!

La supersimmetria ha molte virtù oltre a quelle puramente teoriche: rende precisa l'unificazione degli accoppiamenti di gauge a una scala di circa 10^{16} GeV, garantisce una sufficiente stabilità per il protone e possiede ottimi candidati di materia oscura, in particolare i *neutralini*. I neutralini sono particolari *Wimp* (acronimo inglese di *weakly interacting massive particles*, cioè ‘particelle pesanti che interagiscono debolmente’). Si tratta infatti di particelle con massa tra qualche GeV e qualche TeV, stabili (ovvero che non decadono) e le cui interazioni sono tali da far sì che esse siano prodotte nell'universo primordiale proprio con l'abbondanza richiesta dalle osservazioni cosmologiche. La ricerca delle Wimp procede molto intensamente non solo in Lhc, ma anche in esperimenti di laboratorio e nello spazio, in mare e sotto i ghiacci.

La soluzione del problema della materia oscura, che suggerisce l'esistenza di nuove particelle con masse al di sotto del TeV, rappresenta oggi il problema cruciale della

fisica delle particelle. Infatti non si ha un'idea nemmeno approssimata dell'intervallo di massa rilevante: si va dagli *assioni* (ipotetici bosoni senza carica elettrica e che interagiscono assai poco con la materia), di massa attorno a 10^{-5} eV, ai neutrini *sterili* (ovvero non soggetti ad alcuna interazione tra quelle presenti nel modello standard) di qualche keV, alle già citate Wimp e anche ad altri candidati più esotici.

Per altri fenomeni che indicano nuova fisica esistono, invece, possibili estensioni molto plausibili del modello standard. Per esempio, le minuscole masse dei neutrini possono essere elegantemente spiegate dal cosiddetto *meccanismo ad altalena* (*see-saw mechanism*) (vd. p. 34, ndr).

Come si pone la comunità dei fisici rispetto al problema della “naturalzza”? Molti pensano che il problema potrebbe svanire almeno in parte, se la tanto invocata nuova fisica si decidesse ad apparire nella seconda fase di Lhc a 13-14 TeV, che è stata appena avviata. C'è stato un grande sviluppo di modelli in cui la nuova fisica è effettivamente vicina, ma con proprietà tali da renderla fino ad ora invisibile. Ma altri si rivolgono a contemplare scenari più esotici: la dipendenza dalle masse alte di cui abbiamo parlato non farebbe danno, se non ci fossero nuove particelle fino alla scala di Planck e se un meccanismo dovuto proprio alla sconosciuta teoria della gravità risolvesse il problema della naturalzza a quelle altissime energie. In questo caso però i problemi della materia oscura, delle masse dei neutrini e la bariogenesi andrebbero risolti tutti con una

c.
Le costanti di accoppiamento dell'interazione forte, debole ed elettromagnetica in funzione della scala di energia secondo il modello standard (a sinistra) e secondo il modello standard supersimmetrico minimale (a destra). Nel caso supersimmetrico le tre costanti di accoppiamento assumono lo stesso valore a una scala di energia di circa 10^{16} GeV, così come previsto negli scenari di grande unificazione.



fisica attorno alla scala elettrodebole. Questo è possibile assumendo l'esistenza di nuovi neutrini sterili leggeri (uno di qualche keV e due altri a qualche GeV).

Altri fisici ispirati dal problema della costante cosmologica pensano invece a una soluzione "antropica" del problema, nella quale i valori di alcuni parametri si spiegano non in base a predizioni teoriche, ma con l'osservazione che valori diversi darebbero luogo a un universo completamente differente da quello osservato. Nel caso della costante cosmologica, il problema della "naturalità" consiste nel fatto che questa sia di molti ordini di grandezza più

piccola di quanto ci si aspetterebbe che fosse in base a stime teoriche. Tuttavia il valore osservato è vicino al massimo possibile per permettere la formazione delle galassie e dunque la nostra stessa esistenza. Pertanto se il nostro universo è solo uno dei tanti che continuamente si producono dal vuoto per fluttuazioni quantistiche, come previsto da alcune teorie cosmologiche, ognuno dei quali contiene una fisica diversa, può essere che noi viviamo in un universo molto eccezionale, assai improbabile dal punto di vista teorico, ma l'unico "antropico", ossia l'unico che permette la nostra esistenza.

d.

Uno scorcio del tunnel di 27 km dell'acceleratore Lhc, nella periferia di Ginevra tra la Svizzera e la Francia, dove hanno ripreso a circolare i fasci di protoni dal 4 aprile scorso.

Biografia

Guido Altarelli è professore emerito di fisica teorica all'Università di Roma Tre. È stato direttore della sezione di Roma dell'Infn ('85-'87). Dal 1987 al 2006 ha fatto parte della divisione teorica del Cern, della quale è anche stato direttore ('00-'04).

Su e giù per le scale

Il ruolo delle teorie efficaci

di Marco Ciuchini

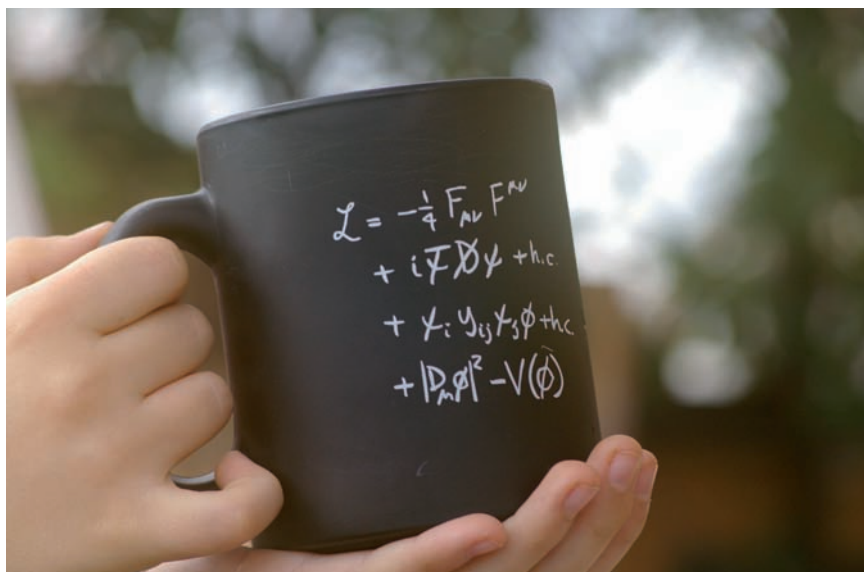


La fisica è caratterizzata dalla presenza di *scale*: scale di distanza, energia, tempo, velocità o qualunque altra grandezza fisica, scale fondamentali o relative a un problema specifico. Fenomeni fisici interessanti avvengono a scale molto diverse: gli ammassi di galassie si scontrano su distanze tipiche di 10^{22} metri, mentre l'urto di due quark in Lhc avviene in una regione di 10^{-19} metri. Se un fenomeno fisico dipendesse allo stesso modo da quello che avviene a tutte le scale, la sua descrizione sarebbe veramente molto problematica. Vale fortunatamente (con qualche notevole eccezione) la separazione delle scale: in generale, i fenomeni fisici che avvengono a una certa scala non sono influenzati dai dettagli della fisica associata a scale molto diverse e in molti casi le quantità fisiche rilevanti cambiano passando da una scala all'altra. Per questo, in presenza di più scale, è conveniente utilizzare una teoria non esatta, che però coglie la fisica rilevante a una data scala e la descrive nella maniera più appropriata. È quella che i fisici chiamano una *teoria efficace*, in contrapposizione alla *teoria fondamentale*, idealmente valida a tutte le scale.

Supponiamo, ad esempio, di voler calcolare la traiettoria di una palla su un tavolo da biliardo. Crediamo di avere a disposizione una teoria fondamentale, la meccanica relativistica basata sulla teoria della relatività ristretta di Einstein. Potremmo certamente usarla, ma di solito non lo facciamo: perché? Perché nel problema ci sono due scale molto diverse: la velocità tipica della palla, diciamo di circa 1 m/s, e la velocità della luce $c = 3 \times 10^9$ m/s, che è una costante fondamentale della teoria. È più conveniente introdurre una teoria approssimata, costruita considerando la velocità della palla come una perturbazione del caso limite che si ottiene considerando infinita la velocità della luce. La teoria efficace che si costruisce prendendo la prima correzione al caso limite non è altro che la meccanica newtoniana (classica), proprio quella che si studia a scuola, dal momento che, pur essendo approssimata, è la più appropriata e conveniente per descrivere oggetti in moto con velocità molto più piccole di quella della luce, ovvero tutti quelli di cui abbiamo esperienza diretta.

Nel contesto della fisica delle particelle elementari (relativistica e quantistica), tutte le scale fisiche sono riconducibili a scale di energia (per questo i fisici delle particelle usano ovunque i multipli dell'elettronvolt). La teoria fondamentale deve dunque descrivere la fisica a tutte le energie includendo tutte le particelle elementari esistenti, comprese quelle che ancora non abbiamo scoperto! Le

teorie efficaci, d'altro canto, come già detto, possono essere convenientemente utilizzate per descrivere processi di bassa energia. Già, ma bassa rispetto a che cosa? Esistono scale di energia associate alle interazioni fondamentali: la *scala delle interazioni forti*, di circa 1 GeV; la *scala di Fermi*, dell'ordine di 100 GeV, associata alla massa dei bosoni W e Z, mediatori delle interazioni deboli; la *scala di Planck*, pari a 10^{19} GeV, associata alla costante di gravitazione universale. Ogni volta che trattiamo processi con energie tipiche molto più piccole di una di queste scale fondamentali (ma ne esistono anche altre, ad esempio quelle delle masse dei fermioni pesanti), possiamo definire una teoria efficace ottenuta, analogamente all'esempio della meccanica classica e relativistica, come perturbazione al caso limite in cui consideriamo infinita l'energia della scala alta della teoria. Questa teoria conterrà solo le particelle rilevanti alla scala dei processi considerati, mentre in generale le particelle più pesanti si *disaccoppiano*. Inoltre, se conosciamo anche la teoria alla scala alta, siamo in grado di calcolare le correzioni al caso limite con precisione arbitrariamente alta. Ma anche se la teoria alla scala alta non è nota, la teoria efficace può essere molto utile: ci consente infatti di parametrizzare la nostra ignoranza in termini di un numero finito di costanti e in modo tale da rispettare le proprietà note della fisica alla scala bassa. La teoria di riferimento per la fisica delle particelle, il modello standard, ad oggi è in accordo con tutti i fenomeni osservati. È una teoria fondamentale oppure è la prima approssimazione di una teoria efficace, valida alle energie raggiunte dai nostri acceleratori, diciamo alla scala di Fermi (anche se Lhc ha iniziato a esplorare la scala del TeV, 10 volte più grande)? Il modello standard non contiene la gravità (perché finora non siamo stati capaci di includerla!), quindi qualcosa deve certamente cambiare alla scala di Planck, dove l'interazione gravitazionale non è più trascurabile. È quindi naturale pensare al modello standard come a una teoria efficace che si ottiene considerando infinita la massa di Planck. Tuttavia ci sono diverse ragioni teoriche e osservative (una per tutte, la materia oscura) per ritenere che possa esistere una scala di energia intermedia tra la scala di Fermi e la scala di Planck, associata alla massa di nuove particelle pesanti. Questa scala, chiamata *scala della nuova fisica*, e queste particelle non incluse nel modello standard sono la nuova fisica che stiamo cercando.



a.
Sulla tazza è raffigurata l'equazione che descrive il modello standard.

Il problema della scala di nuova fisica è che pensiamo esista, ma non sappiamo dire con certezza quanto valga: se dovesse essere più piccola dell'energia raggiungibile in Lhc, le nuove particelle saranno osservate presto e potremo verificare se e con quale delle estensioni del modello standard che sono state pensate negli ultimi quarant'anni (anche qui, una per tutte, la supersimmetria) risulteranno compatibili.

Trovata la teoria della nuova fisica, il modello standard continuerà a valere come teoria efficace per i processi alla scala di Fermi e in più saremo in grado di calcolare le correzioni dovute alle nuove particelle. Se invece non dovessimo riuscire a produrre nuove particelle, aspettando di avere un acceleratore con energia maggiore (vd. p. 19, ndr), possiamo cercare di vedere se ci sono deviazioni dalle previsioni del modello standard indotte da nuove particelle pesanti. Infatti, il principio di indeterminazione di Heisenberg ci dice che le particelle danno un contributo, chiamato *virtuale*, ai processi fisici a una certa energia, anche se sono troppo pesanti per essere prodotte. In questo gioco, la teoria efficace può essere utilizzata in due modi: con un approccio dalla scala alta verso la scala bassa, nel

quale si tenta di "indovinare" la teoria alla scala di nuova fisica, basandosi tipicamente su nuove simmetrie, e con questa si calcolano le correzioni alla teoria efficace "modello standard", oppure nella direzione opposta, dal basso verso l'alto, usando i dati sperimentali per cercare di identificare le possibili correzioni al modello standard nella speranza che questa informazione ci conduca alla nuova teoria.

Qual è il metodo più utile? Il modello standard è stato costruito negli anni '60 usando entrambi gli approcci: si basa su una simmetria, che però è stata identificata grazie a una teoria efficace, chiamata *teoria V-A*, che si usava negli anni precedenti per descrivere le interazioni deboli. Viceversa, il meccanismo di Higgs per la rottura spontanea della simmetria, che pure è un ingrediente indispensabile per costruire un modello realistico, è stato introdotto senza un vero stimolo osservativo, per analogia con problemi di fisica della materia condensata e solo oggi, dopo la scoperta del bosone di Higgs, iniziamo a utilizzare teorie efficaci per descrivere i suoi accoppiamenti. L'esperienza dunque ci dice che la ricerca della nuova fisica va condotta con tutti i metodi a nostra disposizione!

Biografia

Marco Ciuchini è un fisico teorico, dirigente di ricerca e direttore della sezione di Roma Tre dell'Infn. Si occupa di fenomenologia delle particelle elementari e ha lavorato prevalentemente su argomenti di fisica del sapore dei quark.

Link sul web

http://en.wikipedia.org/wiki/Effective_field_theory

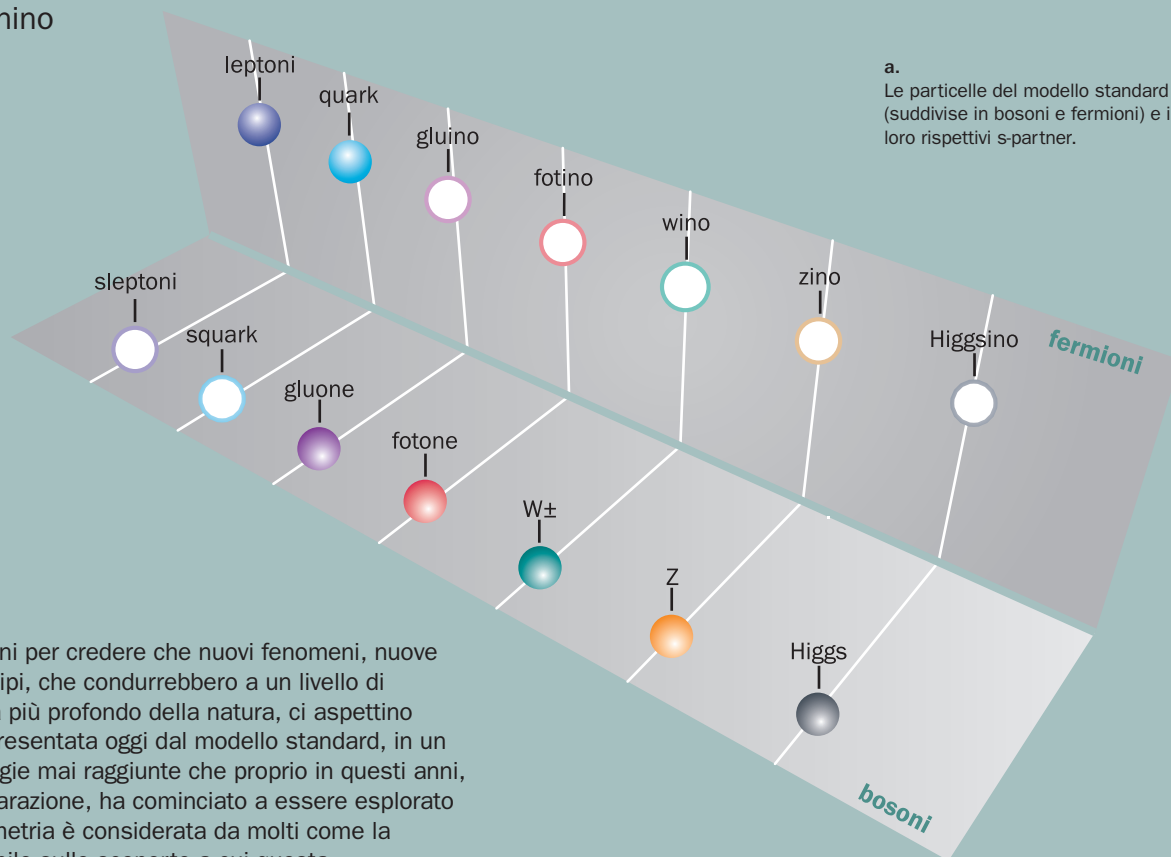
<http://www.preposterousuniverse.com/blog/2013/06/20/how-quantum-field-theory-becomes-effective/>

<http://ocw.mit.edu/courses/physics/8-851-effective-field-theory-spring-2013/>

Il mondo con la esse davanti

Estensioni supersimmetriche del modello standard

di Andrea Romanino



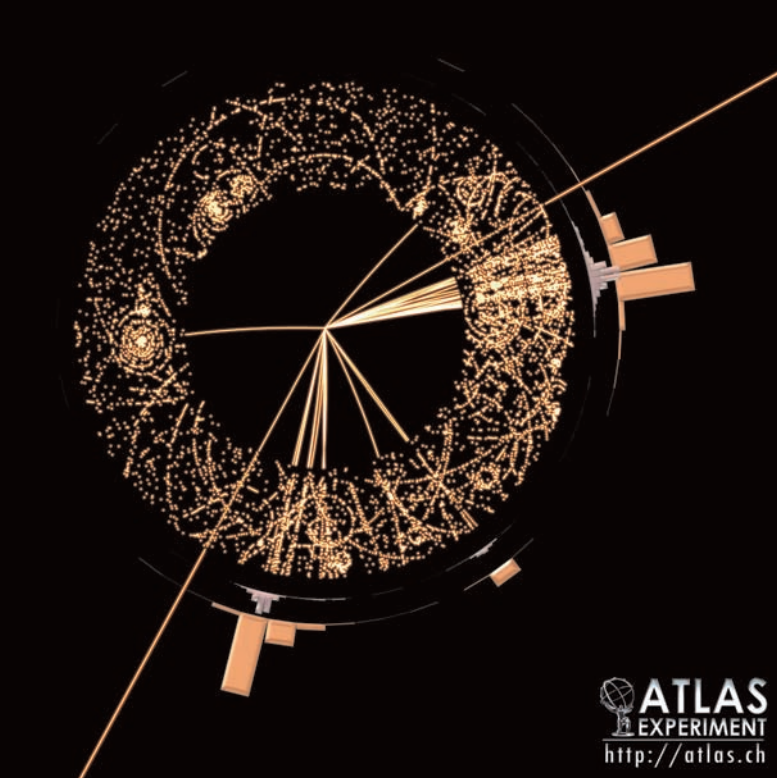
a.
Le particelle del modello standard (suddivise in bosoni e fermioni) e i loro rispettivi s-partner.

Ci sono fondate ragioni per credere che nuovi fenomeni, nuove particelle, nuovi principi, che condurrebbero a un livello di comprensione ancora più profondo della natura, ci aspettino oltre la frontiera rappresentata oggi dal modello standard, in un territorio fatto di energie mai raggiunte che proprio in questi anni, dopo decenni di preparazione, ha cominciato a essere esplorato da Lhc. La supersimmetria è considerata da molti come la congettura più plausibile sulle scoperte a cui questa esplorazione potrebbe portare e una delle idee più promettenti per la nuova fisica oltre il modello standard.

Il concetto di simmetria ha svolto un ruolo cruciale nello sviluppo della fisica fondamentale. Basti pensare alla simmetria dello spaziotempo alla base della teoria della relatività (vd. in *Asimmetrie* n. 11 p. 4, ndr), all'interpretazione delle forze fondamentali in termini di gruppi di simmetria (vd. in *Asimmetrie* n. 16 p. 11, ndr) o all'idea di rottura spontanea di simmetria che sta alla base della scoperta del bosone di Higgs (vd. in *Asimmetrie* n. 16 p. 27, ndr): la natura sembra davvero mostrare una predilezione per la simmetria. La supersimmetria è una simmetria di un nuovo tipo. A differenza delle simmetrie note, mette in relazione particelle con caratteristiche e comportamenti molto diversi, i bosoni e i fermioni. Sono esempi di fermioni le particelle che costituiscono la materia conosciuta, esempi di bosoni la particella di Higgs e quelle che trasmettono le forze (fotoni, gluoni e bosoni W[±] e Z) e si differenziano per il momento angolare (spin), semi-intero i primi, intero i secondi. Se questa simmetria esistesse in natura, ad ogni bosone corrisponderebbe un fermione ancora sconosciuto e viceversa (vd. fig. a): i partner supersimmetrici o s-partner. Il partner supersimmetrico di un

fermione viene denominato anteponendo una "s" al nome del fermione corrispondente, mentre il partner supersimmetrico di un bosone viene chiamato con il nome del bosone corrispondente più il suffisso "ino". Così, ad esempio, il partner supersimmetrico dell'elettrone viene chiamato *seletrone*, il partner del quark top *squark stop* e quello del bosone di Higgs *Higgsino*. La scoperta dei partner supersimmetrici in Lhc rappresenterebbe una clamorosa conferma della validità della supersimmetria.

Le ragioni per cui crediamo che questo potrebbe accadere sono molteplici. Il problema della naturalezza, o della gerarchia, richiede l'esistenza di nuove particelle, presumibilmente visibili in Lhc, che spieghino perché la scala di energie che caratterizza il modello standard (100 GeV) resista alla pressione di enormi correzioni, che la vorrebbero ancora, di molto, più grande. Le particelle previste dalla supersimmetria rappresenterebbero una spiegazione particolarmente convincente. Nel suo insieme, poi, la supersimmetria è una teoria internamente coerente e tecnicamente particolarmente solida, che in linea di principio consente di estrapolare il comportamento delle leggi di natura



b.
Simulazione di produzione di particelle supersimmetriche in Lhc, come sarebbe vista da uno dei rivelatori (Atlas). Le linee rappresentano tracce lasciate nel rivelatore dalle particelle prodotte nell'evento, in particolare quelle derivanti dalla immediata disintegrazione delle particelle supersimmetriche.

a energie fino alla scala di Planck (10^{19} GeV). La soluzione di alcuni dei problemi che richiedono una nuova fisica oltre il modello standard, come la predominanza della materia sull'antimateria nell'universo conosciuto o l'origine della massa dei neutrini, potrebbero risiedere a quelle energie, non lontano da una teoria unificata delle forze conosciute. Inoltre, le predizioni della supersimmetria combaciano perfettamente con quelle delle teorie di grande unificazione, che prevedono che almeno tre (la forza elettromagnetica, debole e forte) delle quattro forze fondamentali della natura non siano altro che aspetti diversi di una sola forza unificata. Quest'ultima idea è particolarmente seducente non solo per eleganza e livello di comprensione profonda che consente in termini, ancora, di simmetrie, ma anche perché permette di capire in un sol colpo le caratteristiche quantitative delle forze tra le particelle descritte dal modello standard, un risultato che è difficile immaginare essere casuale. E che trova, come già detto, piena conferma nella supersimmetria, in cui l'intensità delle tre interazioni del modello standard può essere estrapolata e risulta essere precisamente la stessa all'energia della scala della grande unificazione, ossia dell'ordine di 10^{16} GeV, un altro risultato difficile da ignorare. Infine, un aspetto molto apprezzato della supersimmetria è la possibilità di spiegare la natura della materia oscura (vd. p. 24, ndr). La coerenza sperimentale della teoria avrebbe infatti come conseguenza la stabilità di uno dei partner supersimmetrici, che in tal caso pervaderebbe il nostro universo e potrebbe costituirne, appunto, la materia oscura.

Vediamo dunque che le motivazioni a favore della supersimmetria sono molteplici e convincenti. Non sorprende che, dopo la scoperta del bosone dei Higgs, la supersimmetria sia finita in cima alla lista dei "ricercati" dai fisici delle particelle. Va detto che il primo periodo di funzionamento di Lhc (dal 2008 al 2013) non ha portato alla cattura di particelle supersimmetriche né di altri candidati alla soluzione del

problema della naturalezza. Questo ha portato alcuni teorici a speculare sulla fondatezza dell'argomento di naturalezza alla base della fiducia nella scoperta di nuove particelle in Lhc. Sebbene questa considerazione sia prematura, è già chiaro che, se l'argomento di naturalezza un giorno venisse a cadere, ci ritroveremmo di fronte a un paradosso, la cui spiegazione diventerebbe il tema centrale della nostra ricerca. La sua soluzione potrebbe richiedere un cambio radicale di paradigma, l'utilizzo, ad esempio, di considerazioni antropiche rese possibili dal *multiverso* ipotizzato da alcuni fisici teorici (secondo cui il nostro è solo uno dei molti universi paralleli possibili, vd. anche approfondimento in Asimmetrie n. 14 p. 24). Nonostante ciò, la teoria della supersimmetria potrebbe avere lo stesso un ruolo importante. Potrebbe, infatti, permettere di confermare l'unificazione delle forze e di spiegare l'origine della materia oscura. Sarebbe comunque compatibile con altre idee convincenti sulla fisica oltre il modello standard, riguardanti ad esempio l'origine delle masse dei neutrini. E potrebbe condurre, sulla base, questa volta, del successo sul fronte della materia oscura e dell'unificazione, a possibili segnali negli acceleratori futuri.

Biografia

Andrea Romanino è professore ordinario alla Scuola Internazionale Superiore di Studi Avanzati di Trieste (Sissa). Ha condotto ricerche alla Scuola Normale Superiore di Pisa, all'Università di Oxford, al Cern di Ginevra e al Fermilab di Chicago.

Link sul web

<http://particleadventure.org/supersymmetry.html>

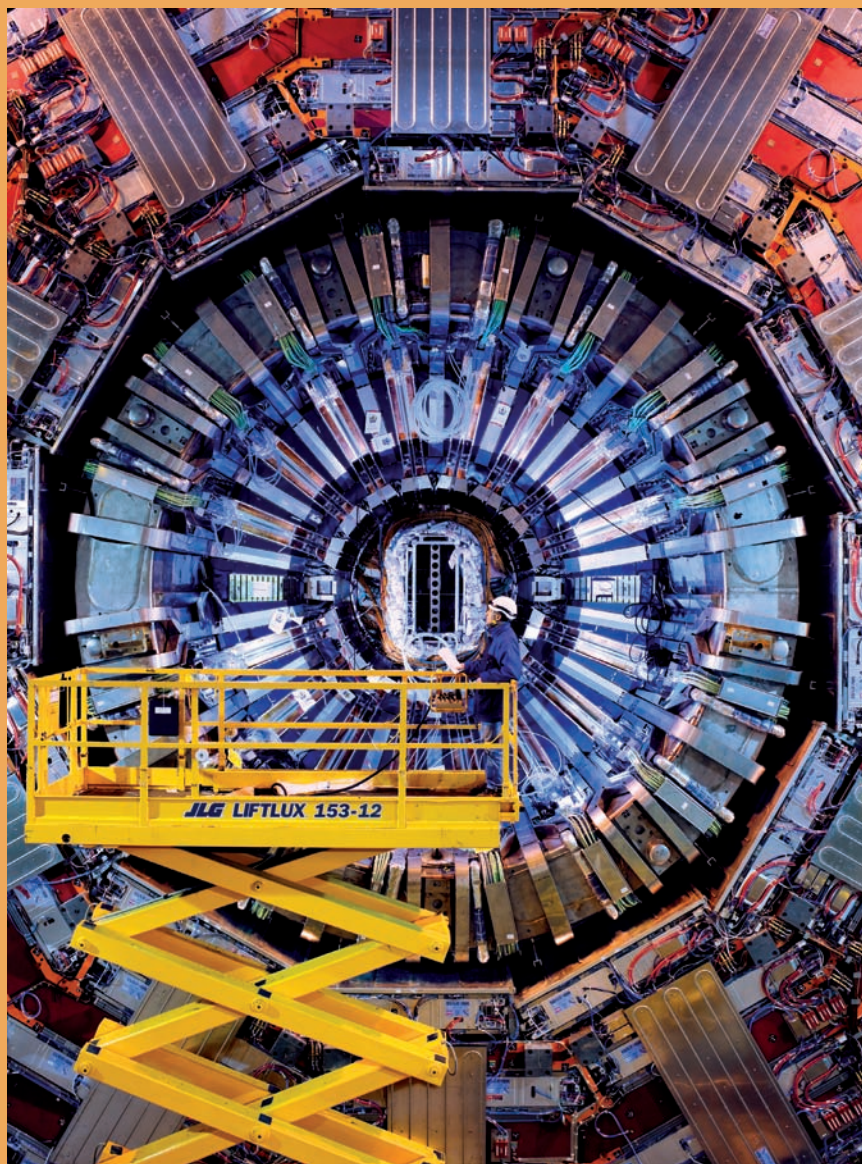
<http://home.web.cern.ch/about/physics/supersymmetry>

Cercasi Susy disperatamente

Lhc alla ricerca della supersimmetria

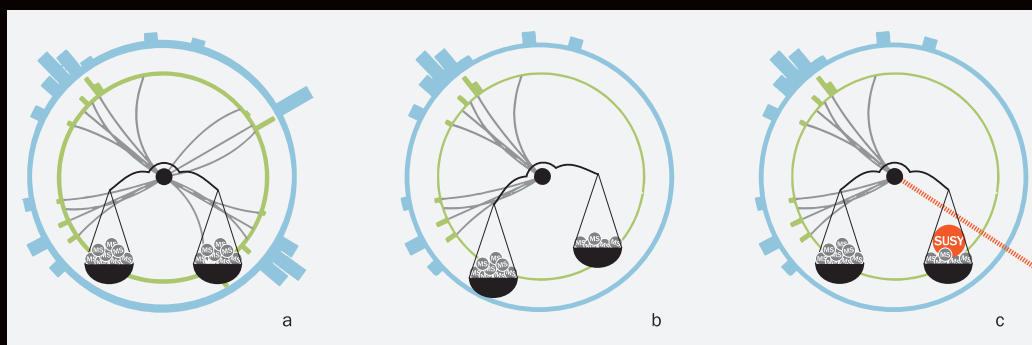
di Daniele Del Re

I fisici hanno un'autentica passione per le leggi di conservazione. Nel misurare i parametri del modello standard, ma anche nella ricerca del bosone di Higgs, esse pongono vincoli stringenti sulla conservazione della quantità di moto e dell'energia misurate per le particelle prodotte in una collisione protone-protone, come quelle che avvengono in Lhc. Quando però si cerca qualcosa di nuovo o inaspettato, il loro approccio cambia. Infatti, è proprio l'apparente non conservazione di queste grandezze fondamentali che consente di individuare eventi non previsti dalla teoria standard. Se nella collisione di due protoni in Lhc si producono anche particelle supersimmetriche, esse decadono e alla fine della cascata producono sia particelle standard che particelle supersimmetriche stabili. Queste sono solo debolmente interagenti con la materia e quindi non possono essere misurate. Ma il fatto di avere la presenza simultanea di particelle identificabili e altre che non lo sono, crea un "non-bilanciamento" che può essere misurato (vd. approfondimento a p. 16). La ricerca della supersimmetria negli esperimenti Atlas e Cms è in uno stadio molto avanzato. Vi sono decine di analisi che studiano i prodotti delle collisioni protone-protone. A seconda del modello supersimmetrico in esame, si cercano diverse tipologie di eventi, ovvero la presenza, ad esempio, di quark bottom o top oppure del bosone di Higgs. Nei dati finora acquisiti dai rivelatori che sono stati analizzati, sfortunatamente, non vi è alcuna traccia di supersimmetria. Pur in assenza di segnale, queste analisi hanno tuttavia permesso di porre vincoli sulla massa delle particelle supersimmetriche, ma vi sono regioni non ancora escluse dalle misure. Man mano che verranno raccolti nuovi dati, le regioni escluse sono destinate a espandersi, a meno che non vengano finalmente scoperte particelle di natura supersimmetrica. Tuttavia esistono scenari in cui l'osservazione di particelle supersimmetriche è più difficile. Per esempio, la natura potrebbe aver organizzato le particelle supersimmetriche con particolari combinazioni di masse che complicano l'osservazione dei prodotti del loro decadimento. Il fatto che finora non si sia osservata la



a.
Il rivelatore Cms, al Cern di Ginevra, che assieme ad Atlas è alla ricerca di segnali di supersimmetria.

Bilance per pesare Susy



1. Rappresentazioni schematiche delle tracce (in grigio) e dei depositi di energia (in azzurro) registrati dagli esperimenti di Lhc. La bilancia sovrapposta rappresenta (a) il bilanciamento energetico dell'evento che coinvolge solo particelle del modello standard, (b) lo sbilanciamento in caso siano presenti particelle supersimmetriche che non vengono osservate e (c) la stima della energia della particella supersimmetrica che si può ottenere assumendo che l'evento sia in effetti bilanciato.

Immaginiamo i rivelatori di particelle come se fossero delle bilance. Le particelle del modello standard sono tutte "visibili" sui piatti della bilancia, perché interagiscono con i rivelatori. Alcune delle particelle supersimmetriche, invece, interagiscono molto debolmente e quindi non possono essere viste.

Supponiamo ora di mettere nei due piatti solo particelle del modello standard. Possiamo dunque verificare se i due piatti con lo stesso peso sono effettivamente in equilibrio: questo è ciò che capita in misure standard. Se invece abbiamo in aggiunta anche una particella supersimmetrica, non la vedremo direttamente, ma la sua presenza potrà essere dedotta dal non bilanciamento dei due piatti (vd. fig. 1b).

Nella realtà, i rivelatori di particelle di Lhc non pesano le particelle, ma misurano il loro impulso e possono verificare se la somma degli impulsi delle particelle prodotte in una collisione è bilanciata (e non si tratta di una normale somma, ma di una somma vettoriale, cioè che tiene conto delle direzioni delle

tracce). Nella fig. 1 vediamo tre disegni che rappresentano, in modo semplificato, eventi ricostruiti nei rivelatori di Lhc. L'evento di sinistra (a) rappresenta un evento simmetrico tipico della fisica standard. Gli impulsi delle particelle, in questo caso, sono bilanciati: dividendo il rivelatore in due emisferi, la somma dei depositi energetici nei calorimetri o degli impulsi delle tracce cariche tra i due emisferi è sempre bilanciata. In presenza di particelle di nuova fisica, una parte dell'impulso è portato da queste, ma non può essere misurato se sono debolmente interagenti. L'impulso portato dalle particelle supersimmetriche è rappresentato dalla linea tratteggiata nella figura di destra (c). Quindi l'evento risulta sbilanciato e, come si può notare in (b), c'è attività solo in un emisfero del rivelatore. Dunque la presenza di un notevole sbilanciamento segnala inequivocabilmente la presenza di nuova fisica. È chiaro che questo metodo funziona bene se la particella supersimmetrica porta con sé un impulso significativo.

supersimmetria ha permesso di escludere alcuni degli scenari più favoriti della teoria, ma non la supersimmetria in toto. Per esempio, l'interpretazione supersimmetrica della materia oscura è ancora perfettamente plausibile (vd. p. 24, ndr). Vi sono ricerche di materia oscura in Lhc, che vanno alla caccia di tipologie di eventi molto semplici. Per esempio, in una collisione protone-protone si cerca la presenza di un solo getto collimato ed energetico di particelle (una collisione in cui tutte le tracce rappresentate in fig. 1b sono molto vicine tra loro, formando una specie di cono) oppure di un solo fotone

o di un bosone Z. E in aggiunta, come spiegato nell'approfondimento, l'evento deve essere molto sbilanciato. Anche queste ricerche non hanno ancora dato esiti positivi.

La seconda fase di presa dati di Lhc, con collisioni protone-protone a 13-14 TeV, è appena iniziata. Questa nuova presa dati presenta due vantaggi per la ricerca della supersimmetria. Innanzitutto, l'energia delle collisioni sarà quasi doppia rispetto alla precedente, permettendo così di produrre con più efficacia eventuali particelle supersimmetriche di massa elevata. Ciò consentirà di estendere la ricerca a territori finora inesplorati.

Inoltre, il numero di collisioni che verranno registrate nei prossimi anni sarà circa 10 volte superiore a quello raccolto precedentemente. Poiché la sensibilità delle ricerche cresce con il numero di collisioni analizzate, sarà possibile evidenziare la presenza di piccoli eccessi dovuti alla supersimmetria. Nel complesso, dunque, i prossimi anni saranno importantissimi per la ricerca della supersimmetria e di nuova fisica e Lhc potrà dare un contributo cruciale e indipendente rispetto agli esperimenti nello spazio e rispetto a quelli che cercano in modo diretto la materia oscura.

Biografia

Daniele del Re è ricercatore universitario nel dipartimento di Fisica dell'Università "La Sapienza" di Roma. Dal 2006 lavora nell'esperimento Cms. Ha ricoperto diversi incarichi nell'esperimento e attualmente è il coordinatore del gruppo che cerca nuova fisica con canali esotici.

Link sul web

<http://cms.web.cern.ch/>

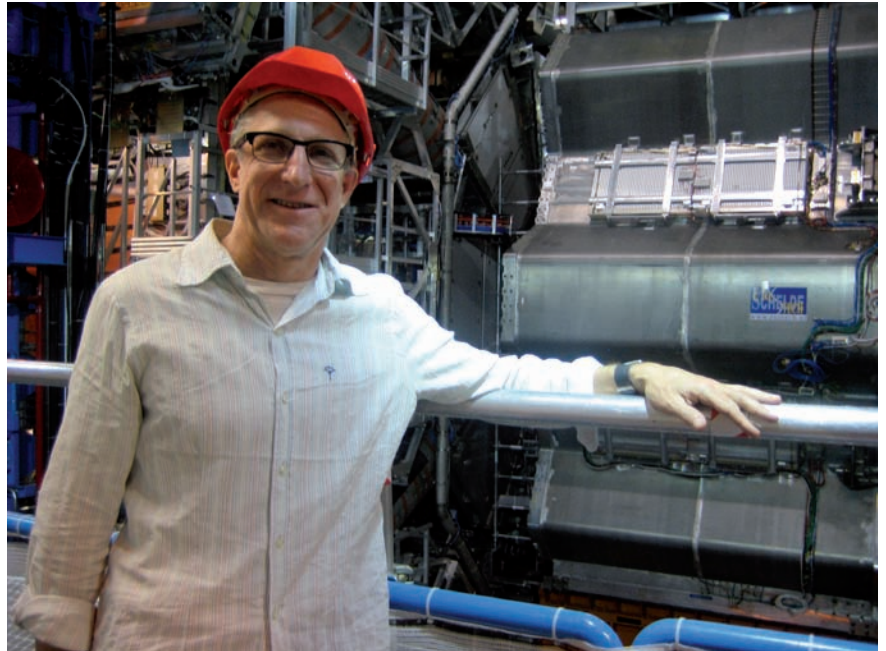
<http://atlas.web.cern.ch/>

[as] con altri occhi

Febbre da particelle.

di Mark Levinson

regista del film *La particella di Dio*



Mi chiedono spesso consigli su come entrare nell'industria cinematografica. Rispondo che la buona notizia è che non occorre frequentare una scuola di cinema; la cattiva è che ho un dottorato in fisica teorica. In un certo senso, il lavoro di pre-produzione del film *La particella di Dio* (*Particle Fever*) è stato il più lungo della storia del cinema.

Sebbene il salto dalla fisica alla cinematografia possa sembrare enorme, quasi un salto quantico, il passaggio è avvenuto in modo abbastanza naturale. La fisica mi affascinava per l'eleganza e la bellezza profonda delle teorie, per la magia e il mistero racchiusi nei simboli astratti che, pur se inventati dall'uomo, svelano verità profonde sull'universo. Sono passato alla cinematografia quando ho capito che costituiva un'alternativa, altrettanto magica e misteriosa, per rappresentare ed esplorare il mondo.

Nel mondo del cinema ho scelto di occuparmi di finzione narrativa. Per molti anni ho coltivato

la speranza di trovare un progetto che potesse coniugare queste mie due anime, apparentemente incompatibili tra loro, e che trasponesse le emozioni della fisica in un'opera artistica. Raramente la scienza è stata rappresentata adeguatamente nella finzione cinematografica, così cominciai a pensare a diversi scenari su cui basare un film. In seguito, grazie ad alcuni possibili finanziatori per una sceneggiatura che avevo scritto, sentii parlare di David Kaplan, un fisico che desiderava realizzare un documentario sull'impresa di Lhc.

David è un teorico delle particelle che era coinvolto direttamente in Lhc e che interagiva quotidianamente con persone che riponevano grandi speranze in quello che avrebbe trovato Lhc. Alcuni di loro avevano aspettato 30 anni un esperimento come questo, che potesse finalmente confermare o meno le loro teorie. Si trattava di un momento unico nella storia della scienza, una svolta che avrebbe

a.

Il regista Mark Levinson davanti all'esperimento Atlas del Cern.



b.
Proiezione del film *Particle Fever* al Cern nel novembre 2014. In sala erano presenti il regista e tutti gli “attori”, tra cui (terza da sinistra) Fabiola Gianotti. In Italia il film è prodotto da Feltrinelli Real Cinema in collaborazione con LaEffe.

sicuramente risposto ad alcune delle domande più profonde sulle leggi dell'universo. Mi fu subito chiaro che questa avrebbe potuto essere la perfetta combinazione di una grande scoperta scientifica e di una spettacolare vicenda umana.

Quando incontrai David, gli confessai che non mi interessava realizzare un documentario “scientifico” tradizionale che cercasse di spiegare ogni cosa, quanto piuttosto una vicenda umana, incentrata sui personaggi, che mi permettesse di ricorrere agli strumenti narrativi che avevo sviluppato. Questo era l'aspetto che più mi affascinava. E questo era esattamente quello che David voleva realizzare.

Ovviamente la realizzazione del film comportava molte sfide. In primo luogo, l'esperimento coinvolgeva 10.000 persone. Eravamo certi di volere una storia basata sui singoli personaggi, ma chi scegliere? Per di più le persone erano sparse in tutto il mondo. Sarebbe stato possibile, dato il budget abbastanza limitato, coinvolgere persone provenienti da così tanti Paesi? Poiché volevamo raccontare la storia di una scoperta

scientifica reale, dovevamo decidere continuamente quando e dove si sarebbero verificati eventi significativi. E ancora più importante, quanto a lungo avrebbero dovuto durare le riprese? E che cosa avremmo fatto, se alla fine non ci fosse stata alcuna scoperta? David e io ci incontrammo alla fine del 2007 e incominciai a lavorare seriamente al documentario a tempo pieno all'inizio del 2008. Pensavo continuamente a una possibile conclusione, a qualcosa che potesse rappresentare una fine interessante per il film. In realtà non credevamo che avrebbero scoperto il bosone di Higgs durante le riprese. Secondo la maggior parte dei fisici l'eventualità era improbabile e gli sperimentali avrebbero avuto bisogno di anni per capire a fondo il funzionamento dei loro rivelatori. E proprio quando stavamo completando la pellicola con i risultati provvisori, venne dato il grande annuncio: era il 4 luglio 2012. La scoperta del bosone di Higgs divenne l'epilogo reale e straordinario del nostro film.

La sfida maggiore in fase di realizzazione è stata certamente rendere il film

accessibile a un pubblico non esperto. Desideravamo creare un film comprensibile al grande pubblico, senza rinunciare all'autenticità. La scelta chiave divenne a che cosa rinunciare: non volevamo un film che spiegasse ogni cosa, ma che trasmettesse fedelmente l'emozione di una vera scoperta scientifica.

Una delle strategie con cui speravo di avvicinare il grande pubblico era enfatizzare i paralleli esistenti tra le frontiere della ricerca scientifica e l'arte, e molti dei nostri “attori” hanno colto questo legame. Verso la fine delle riprese uno degli “attori”, il fisico Savas Dimopoulos, disse: “Perché ci occupiamo di scienza? E di arte? Perché sono proprio le cose che non sono direttamente necessarie alla sopravvivenza che ci rendono umani!”. Fabiola Gianotti, invece, cita la *Divina Commedia*: “Fatti non foste a viver come bruti, ma per seguir virtute e canoscenza”. Scienza e conoscenza sono molto importanti, proprio come l'arte. Sono un bisogno dell'umanità. Alla fine spero che questo sarà il messaggio trasmesso da *La particella di Dio*.

Una buona spinta

Acceleratori per la nuova fisica

di Lucio Rossi

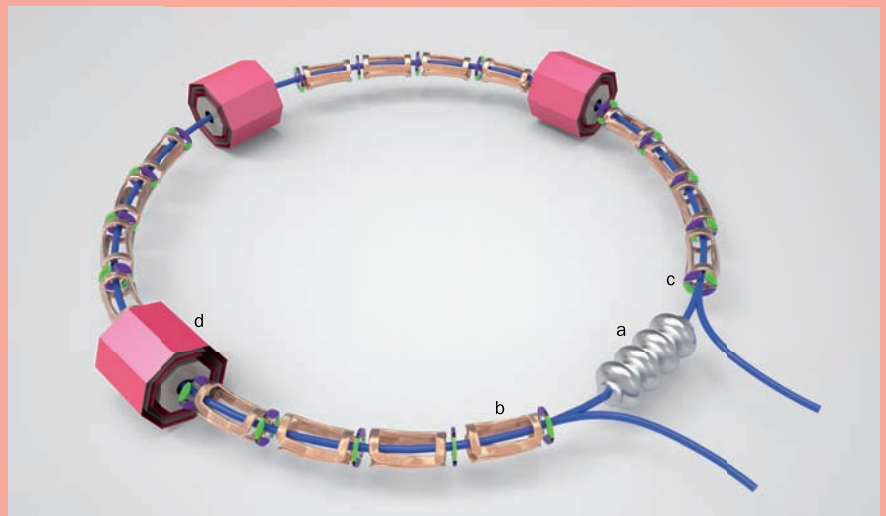
A partire dalle prime macchine costruite negli anni '30 da John Cockcroft ed Ernest Walton in Inghilterra e da Ernest Lawrence negli Stati Uniti e, poi, grazie al concetto di *collisore* di Ada (Frascati, primi anni '60), gli acceleratori hanno accompagnato il progresso della fisica nucleare e delle particelle fino alla scoperta del bosone di Higgs. Si può dire che essi sono stati lo strumento principale dei fisici che vanno a caccia dell'infinitamente piccolo, fino ad arrivare, con Lhc, a risolvere dettagli dell'ordine di 10^{-20} metri, migliorando di un paio di ordini di grandezza la risoluzione del precedente acceleratore del Cern di Ginevra, il Lep (il grande collisore elettroni-positroni). Per la capacità di concentrare energia su spazi piccolissimi, gli acceleratori sono anche delle macchine del tempo: in Lhc indaghiamo come era l'universo a meno di un *picosecondo* (cioè 10^{-12} secondi) dopo il Big Bang.

Le particelle accelerate sono generalmente elettroni o protoni, talvolta anche ioni di vario tipo, dall'idrogeno all'uranio completamente ionizzato e perfino ioni radioattivi altamente instabili. Ma, soprattutto per la fisica delle alte energie, si accelerano anche positroni (antielettroni), antiprotoni e, ma si tratta di una sperimentazione ancora in corso, muoni.

Gli acceleratori si sono evoluti lungo due linee principali: le macchine circolari (*ciclotroni* e poi *sincrotroni*) e le macchine

lineari (*linac*). In entrambi i casi l'energia è impartita alle particelle per mezzo di *cavità risonanti a radio frequenza* (Rf), in cui sono presenti delle onde elettromagnetiche. I magneti servono per guidare i fasci di particelle (per esempio a tenerli in un'orbita circolare nei sincrotroni) e per focalizzarli – lenti magnetiche – evitando che si perdano contro le pareti della camera a vuoto. In fig. a sono illustrate le componenti principali di un acceleratore circolare, in cui il fascio viene fatto circolare tante volte nelle cavità a radio frequenza, che quindi non devono avere tensioni elevate o essere particolarmente lunghe. In compenso la parte magnetica diviene preponderante, poiché per ottenere alte energie occorre sia aumentare il campo magnetico che il raggio dell'acceleratore. Un acceleratore lineare è invece costituito da una serie di cavità a radiofrequenza, ciascuna attraversata una volta sola dalle particelle accelerate: grandi tensioni a radiofrequenza (decine di milioni di volt) sono importanti per limitare le dimensioni della macchina. Nei linac i magneti servono principalmente per mantenere focalizzato il fascio. Il grande collisore adronico Lhc con i suoi 27 km di circonferenza, con 1700 grandi magneti superconduttori da 7 e 8 tesla (per confronto, un tesla è il campo magnetico prodotto da una macchina per la risonanza magnetica e il campo magnetico

a.
Le componenti principali di un acceleratore di particelle tipo Lhc: cavità acceleratrici a radiofrequenza (a), magneti dipolari (b) per guidare il fascio e magneti quadrupolari (c) per focalizzarlo. Sono raffigurati anche tre rivelatori di particelle (d).



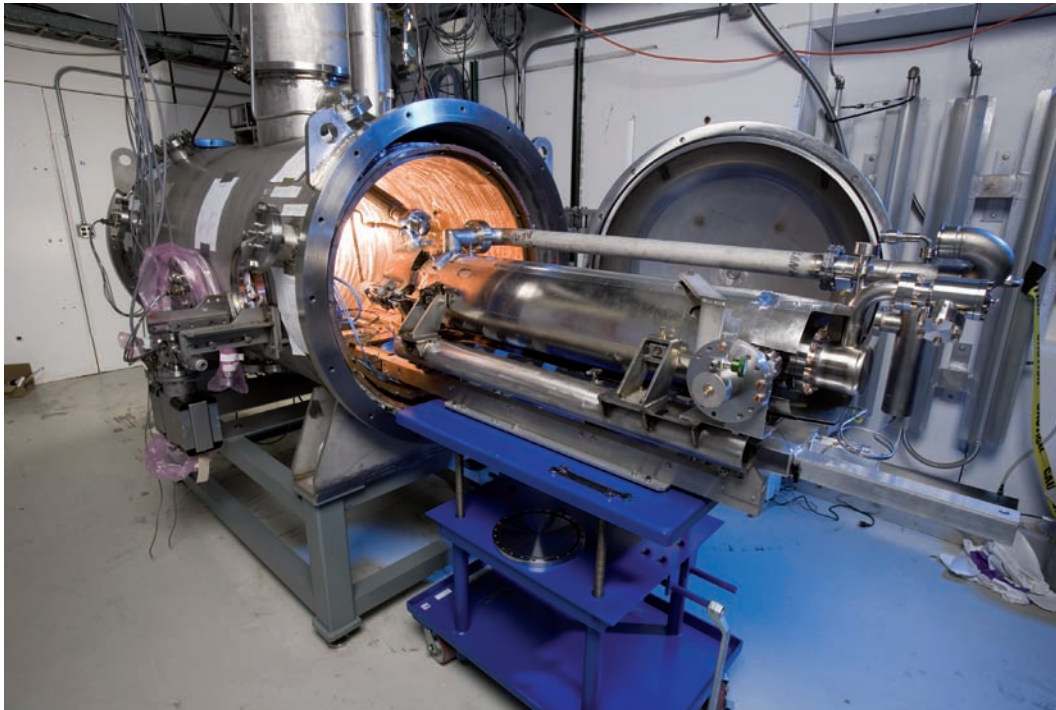
terrestre, che orienta l'ago della bussola, è di pochi centesimi di millesimo di tesla) e l'energia massima di 14 TeV, è stato il culmine di quarant'anni di sviluppo dei collisori superconduttori e ha richiesto oltre vent'anni per il disegno e la costruzione.

Il primo passo per andare oltre i limiti di Lhc è già in corso: il progetto Lhc ad alta luminosità (High Luminosity Lhc o Hilumi) sta sviluppando nuove tecnologie per magneti superconduttori da 11 e 12 tesla utilizzando un materiale superconduttore più avanzato, ma anche molto più complesso e costoso rispetto al niobio-titanio (Nb-Ti) utilizzato in Lhc: il niobio-3-stagno (Nb₃Sn). Hilumi ha un numero limitato di magneti, circa 50, e costituisce il banco di prova ideale per questa tecnologia. In Hilumi si sviluppa anche un nuovo tipo di cavità a radio frequenza, anch'essa superconduttrice e detta *crab cavity* ("cavità a granchio"), per ruotare i fasci e aumentare la *luminosità*, cioè il numero di collisioni tra particelle che l'acceleratore può produrre nell'unità di tempo.

Lhc ad alta luminosità permetterà di misurare con maggiore precisione le proprietà del bosone di Higgs e di eventuali altre nuove particelle. L'entrata in funzione è prevista nel 2025, con un costo di costruzione di circa 700 milioni di euro per i soli componenti e una durata di funzionamento di 10-15 anni.

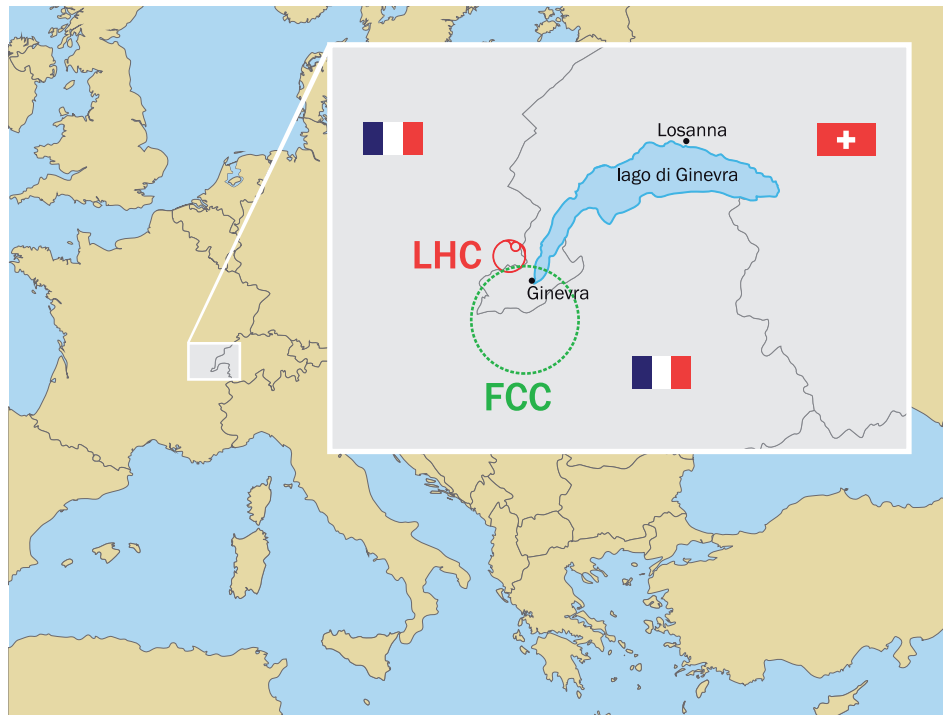
Un progetto molto diverso, ma che pure si pone alla frontiera della fisica di precisione, è l'Ilc (International Linear Collider). Il vantaggio di un collisore lineare rispetto a un collisore circolare è dato dalla possibilità di accelerare particelle cariche leggere, come elettroni e positroni, senza che esse subiscano perdite di energia quando attraversano i magneti utilizzati per deviarne la traiettoria. La perdita di energia per emissione di radiazione è molto limitata nei linac e rende possibile accelerare particelle leggere a energie maggiori.

Basato su potenti cavità superconduttrici, con una tensione di 30 milioni di volt (cinque volte più elevata di quella delle cavità di Lhc), l'Ilc si pone l'obiettivo di far scontrare elettroni contro positroni. In una prima fase l'energia nel centro di massa (cioè l'energia effettivamente disponibile) dovrebbe essere di 0,5 TeV con la possibilità di raggiungere in una seconda fase il TeV. Il progetto, erede del progetto tedesco Tesla proposto sin dalla metà degli anni novanta, ha fatto molti progressi ed è in avanzata fase di maturità, pur presentando notevoli sfide tecnologiche. Il costo totale è dell'ordine dei 10 miliardi di euro. L'orizzonte temporale è dopo il 2030. A fronte del vantaggio di avere un precursore tecnologico, il progetto X-ray Fel (Free Electron Laser) di Amburgo – un linac per elettroni di più bassa energia basato proprio sulle stesse tecnologie a radio frequenza – il progetto Ilc ha due punti deboli: costa molto, restando sotto le energie di Lhc anche nella configurazione massima e, richiedendo quasi 50 km di alta tecnologia, la sua utilità dipende criticamente anche dalla luminosità raggiungibile, che per i linac è molto inferiore rispetto agli acceleratori circolari. Un altro progetto di collisore lineare per elettroni-positroni è Clic (Compact Linear Collider). Basato su un sistema a due acceleratori, con cavità in rame ad altissima frequenza e tensioni di 100 milioni di volt, in linea di principio può triplicare le prestazioni di Ilc, grazie ai suoi 3 TeV nel centro di massa per 50 km di lunghezza. Promosso dal Cern, con un'ampia collaborazione internazionale, è meno avanzato tecnologicamente del "concorrente" Ilc. Potrebbe essere pronto per la costruzione nel 2020-2025 e quindi partire tra il 2035 e il 2040. Il suo punto debole è il consumo energetico di circa 600 megawatt (non si usano cavità o magneti superconduttori), pari alla potenza erogata da una centrale elettrica medio-grande.



b.
Una cavità superconduttrice in niobio per Ilc, racchiusa nella camera criogenica a elio, mentre viene inserita nella stazione di test al Fermilab, a Chicago (Usa).

c.
Collocazione dell'anello di 100 chilometri Fcc tra la Svizzera e la Francia, in rapporto all'attuale di Lhc.



Inoltre manca un vero “dimostratore di scala”: un prototipo di acceleratore di dimensioni contenute (anche qualche percento dell’acceleratore finale) che ne dimostri la funzionalità. Se però Lhc scoprisse una o più particelle con massa tra 0,5 e 1,5 TeV, Ilc non potrebbe “vederle”, mentre Clic sì. Il costo di costruzione è comparabile a quello di Ilc (essendo meno “maturo”, però, le cifre sono meno solide), ma i costi di operazione rischiano di essere molto più elevati. Nell’ambito degli acceleratori circolari c’è da registrare la battuta di arresto degli studi sul Muon Collider (collisore di muoni) decisa dagli Stati Uniti nel 2014. Tutte le forze si concentrano quindi sul nuovo progetto proposto dal Cern, il Fcc (Future Circular Collider). Basato su un anello sotterraneo di circa 100 km da costruire nella zona di Ginevra, sfrutterebbe tutta l’infrastruttura esistente al Cern, ma ne richiederebbe tanta altra in aggiunta. L’idea è che l’anello sia onnicomprensivo: il collisore adronico da 100 TeV nel centro di massa per collisioni protone-protone (e ioni pesanti come in Lhc), Fcc-hh, potrebbe arrivare dopo un collisore elettrone-positrone da 350 GeV (cioè 0,35 TeV) nel centro di massa, Fcc-ee. In Fcc si potrebbero quindi ottenere anche collisioni elettrone-protone ed elettrone-ione (Fcc-he). Il collisore leptonico, la cui energia è limitata dall’enorme radiazione di sincrotrone emessa dagli elettroni, potrebbe fornire la luminosità richiesta dai fisici delle particelle più rapidamente e più sicuramente rispetto a Ilc. Il collisore adronico Fcc-hh, d’altra parte, richiede un investimento tecnologico notevole, dato che si basa su magneti superconduttori simili a quelli che servirebbero per Hilumi, ma ancora più potenti. Infatti è necessario raggiungere il valore di 15-16 tesla e si prospetta persino una ipotesi – per ora preliminare – di 20

tesla, per ridurre il raggio della macchina o aumentarne l’energia. Questo lavoro richiede un ulteriore periodo di ricerca e sviluppo oltre a quello necessario per Hilumi. Fcc potrebbe essere approvato intorno al 2022-2025 ed essere pronto a partire verso il 2040, anche se il collisore leptonico Fcc-ee potrebbe essere pronto già qualche anno prima, dato che non richiede particolari sviluppi tecnologici. La sfida è formidabile ma non esistono motivi di principio perché 15-16 tesla non siano raggiungibili con magneti basati sulla tecnologia del niobio-3-stagno di Hilumi. La possibilità di raggiungere i 20 tesla e oltre, dipende invece dallo sviluppo di materiali superconduttori ad alta temperatura che oggi sono molto costosi e non ancora adatti all’utilizzo in magneti per acceleratori di particelle. Dal punto di vista della fisica degli acceleratori Fcc è un’opzione più “tradizionale e sicura”, anche in termini di luminosità: tutto ciò che si impara in Hilumi è immediatamente trasferibile su Fcc-hh. I costi non sono noti, lo studio inizia ora, ma la cifra potrebbe aggirarsi attorno ai 15 miliardi di euro. Un vantaggio è dato dall’utilizzo di una notevole infrastruttura esistente, il Cern e Lhc, ma anche dalla condivisione della nuova grande infrastruttura (tunnel, criogenia, ecc.) per i diversi acceleratori proposti. Un passo intermedio sulla strada verso Fcc potrebbe essere il raddoppio di energia di Lhc, proposto nel 2010 con il nome di High Energy Lhc e basato sull’utilizzo di magneti da 16 o 20 tesla per raggiungere le energie di 26 e 33 TeV, da installare al posto di Lhc nel medesimo tunnel, minimizzando i costi dell’infrastruttura. In questo scenario si aggiunge il pungolo della sfida cinese. Un gruppo di fisici cinesi propone di costruire un acceleratore con un tunnel di 50-70 km a sud di Shanghai, con lo scopo iniziale di fare su tempi rapidi (dal 2030) un collisore leptonico circolare

Il momento critico per una decisione potrebbe essere il rinnovo della Strategia Europea della Fisica delle Alte Energie, prevista per il 2018-2020. Nel frattempo i nuovi dati raccolti dagli esperimenti in Lhc avranno dato le indicazioni di fisica che ora ci mancano e si conoscerà di più dell'evoluzione tecnologica dei nuovi magneti ad alto campo e delle cavità a radio

The chart illustrates the historical and projected development of particle accelerators. The vertical axis shows energy in GeV on a logarithmic scale from 0.001 to 100. The horizontal axis shows years from 1940 to 2050. Accelerators are color-coded: blue for proton synchrotrons, pink for hadron colliders, green for lepton colliders, orange for electron-proton colliders, and black for superconductors. An inset map shows the global distribution of these facilities.

Accelerator	Location	Category	Approx. Energy (GeV)	Operational Period
BEVATRON	LBL	Proton Synchrotron	~6.3	1964-1983
PS	CERN	Proton Synchrotron	~26.7	1959-1990
AGS	BNL	Proton Synchrotron	~10	1960-1982
COSEMO	BNL	Proton Synchrotron	~1.5	1962-1982
SINCRIFASOTRONE	JINR	Proton Synchrotron	~10	1960-1982
SERPUKHOV	JINR	Proton Synchrotron	~26.7	1960-1982
SPS	CERN	Proton Synchrotron	~26.7	1976-1986
PEP	SLAC	Proton Synchrotron	~8	1979-1986
CESR	CERN	Proton Synchrotron	~3.7	1979-1986
DAFNE	LNF	Superconductor	~1.3	1984-1998
KEKB	KEK	Superconductor	~3.5	1989-1998
PEP2	SLAC	Superconductor	~8	1990-1998
TRISTAN	KEK	Superconductor	~6	1989-1996
TEVATRON	FNAL	Superconductor	~980	1987-2011
SPS	CERN	Superconductor	~6.3	1976-1986
ISRA	CERN	Superconductor	~26.7	1986-1990
PETRA	DESY	Superconductor	~6	1988-1990
SLC	SLAC	Superconductor	~50	1989-1990
HERA	DESY	Superconductor	~26.7	1992-1997
LEP	CERN	Superconductor	~100	1989-1990
LEP2	CERN	Superconductor	~130	1996-1997
LHC	CERN	Superconductor	~7000	2008-2011
LHC	CERN	Superconductor	~13000	2015-2025
HILUMI	LHC CERN	Superconductor	~13000	2025-2035
FCC-ee	CERN	Superconductor	~13000	2035-2045
CLIC	CERN	Superconductor	~13000	2035-2045
FCC-hh	CERN	Superconductor	~100000	2040-2050

<http://tlep.web.cern.ch/>
<http://lpap.epfl.ch/page-54797-en.html>
<https://www.linearcollider.org/ILC>

[as] riflessi

Magneti per il futuro.

di Eleonora Cossi



Asg Superconductors è un'azienda italiana che vanta una storia di tecnologia di frontiera nel campo dei magneti convenzionali e superconduttori che risale agli anni '50. Dalle officine dell'Unità Magneti del gruppo industriale Ansaldo, diventato nel 2001 Asg Superconductors, sono usciti magneti che sono stati impiegati nei più importanti laboratori ed esperimenti di fisica delle alte energie europei, tra cui i dipoli per il progetto Elettra a Trieste ed Hera ad Amburgo, i quadrupoli per il progetto Esrf a Grenoble e barre e quadrupoli per l'acceleratore Lep del Cern. Durante la costruzione di Lhc i "tecnici" di Asg hanno realizzato 400 magneti destinati all'acceleratore e ai rivelatori degli esperimenti Cms e Atlas e oggi l'azienda è impegnata nella produzione di nuovi magneti superconduttori per Hilumi.

"Da circa un anno, ingegneri di Asg stanno lavorando presso i laboratori del Cern per progettare i magneti che consentiranno a Lhc di raggiungere valori di luminosità più elevati. Contemporaneamente, personale di officina sta contribuendo anche al trasferimento di quelle metodologie costruttive indispensabili per realizzare il nuovo acceleratore", ci racconta Vincenzo Giori, amministratore delegato di Asg Superconductors.

[as] In particolare, a quali magneti sta contribuendo l'azienda?

[Vincenzo Giori]: Asg sta collaborando alla progettazione e costruzione dei magneti quadrupolari e dipolari, responsabili, i primi, della corretta focalizzazione del fascio durante le sue orbite nell'acceleratore e, i secondi, della definizione della traiettoria di orbita di fatto seguita dal fascio.

[as] Cosa caratterizza questi nuovi magneti?

[Vincenzo Giori]: La caratteristica distintiva dei magneti su cui stiamo lavorando è il tipo di materiale superconduttore usato, il niobio-3-stagno (Nb_3Sn) mai impiegato prima d'ora per la costruzione di acceleratori a causa della particolare complessità tecnologica che la loro costruzione comporta. A differenza del più frequentemente usato niobio-titanio ($Nb-Ti$), il niobio-3-stagno consente un maggiore trasporto di corrente elettrica, ma deve essere sottoposto a un trattamento termico a $650^{\circ}C$, altrimenti si comporta come un pessimo conduttore.

[as] La superconduttività ha applicazioni promettenti in ambiti che vanno dalla fusione termonucleare all'ottimizzazione delle reti elettriche e alle applicazioni medicali. Quali applicazioni si intravedono per il niobio-3-stagno?

[Vincenzo Giori]: Il niobio-3-stagno è l'unico materiale affidabile che consente ad oggi di produrre campi magnetici oltre 20 tesla, con ricadute potenzialmente crescenti nello studio di nuovi farmaci. Tuttavia, per diffonderne l'utilizzo ad altri settori applicativi dovrebbe migliorare drasticamente in termini di costo e praticità di utilizzo.

a.

Vincenzo Giori, amministratore delegato della Asg Superconductors con sede a Genova.

Dietro le quinte dell'universo

Ipotesi sulla materia oscura

di Gianfranco Bertone



Se osservate il cielo da un luogo sufficientemente buio, la Via Lattea vi apparirà come una striscia di luce diffusa che attraversa tutto il firmamento. Realizzare che ciò che James Joyce chiamò “l’infinita lattiginosa via lattea scintillante” altro non è che il disco di stelle e gas della galassia in cui viviamo, visto “dal di dentro”, è una rivelazione che dà al cielo una nuova prospettiva e restituisce la giusta profondità a un cosmo che ci appare altrimenti schiacciato su un’immaginaria volta celeste.

Nella galassia in cui viviamo – la Via Lattea, appunto – c’è però, secondo la cosmologia moderna, molto più di quanto sia visibile a occhio nudo. Non solo c’è più materia di quanta se ne riesca a vedere anche con i nostri più potenti telescopi, ma, come sappiamo oggi, tale materia non è fatta di stelle, pianeti, comete, asteroidi o gas: è qualcosa di

fondamentalmente diverso da qualunque altra sostanza sia mai stata osservata nei nostri laboratori. Viene chiamata *materia oscura*, perché non emette né assorbe luce, ma il nome è particolarmente appropriato per una sostanza la cui natura è avvolta nel mistero.

Ci volle del tempo prima che la comunità scientifica accettasse questa conclusione, ma dopo decenni di ricerche pionieristiche, alla fine degli anni '70 le prove per l’esistenza della materia oscura divennero praticamente inconfutabili. Alle misure disponibili allora, come le anomalie nelle velocità di rotazione di stelle e gas a grandi distanze dai centri galattici e l’inspiegabile velocità di galassie raggruppate in grandi ammassi, si aggiunge oggi l’analisi della cosiddetta radiazione cosmica di fondo, scoperta nel 1964 da Arno Penzias e Robert Wilson e misurata con straordinaria

precisione da satelliti come Wmap della Nasa nel 2003 e, recentemente, Planck dell’Agenzia Spaziale Europea (vd. in *Asimmetrie* n. 15 p. 33, ndr).

Come un iceberg di cui vediamo solo la punta (vd. in *Asimmetrie* n. 14 p. 9, ndr), ma di cui intuimo una parte sommersa attraverso l’applicazione delle leggi della fisica, l’universo che ci è familiare rappresenta solo una piccola parte, il 5% circa, della materia-energia complessiva. Identificare la natura del restante 22%, composto di materia oscura, e del 73%, composto di energia oscura (vd. p. 30, ndr), è uno degli obiettivi centrali della cosmologia moderna.

Ma come si fa a cercare qualcosa di cui non si conosce nulla? Una delle idee più interessanti, e forse quella su cui si concentra maggiormente l’attenzione della comunità scientifica oggi, è che la materia oscura sia composta di un nuovo tipo di particelle elementari, chiamate genericamente Wimp (Weakly Interacting Massive Particles), cioè ‘particelle pesanti che interagiscono debolmente’. Le Wimp sono interessanti per diversi motivi: la loro esistenza è predetta da nuove teorie di fisica delle particelle – come ad esempio la supersimmetria – che cercano di spiegare ed estendere il modello standard della fisica delle particelle; possono essere prodotte facilmente nella giusta quantità pochi istanti dopo il Big Bang; e possono essere scoperte con una serie di esperimenti attivi oggi o nel prossimo futuro.

a.

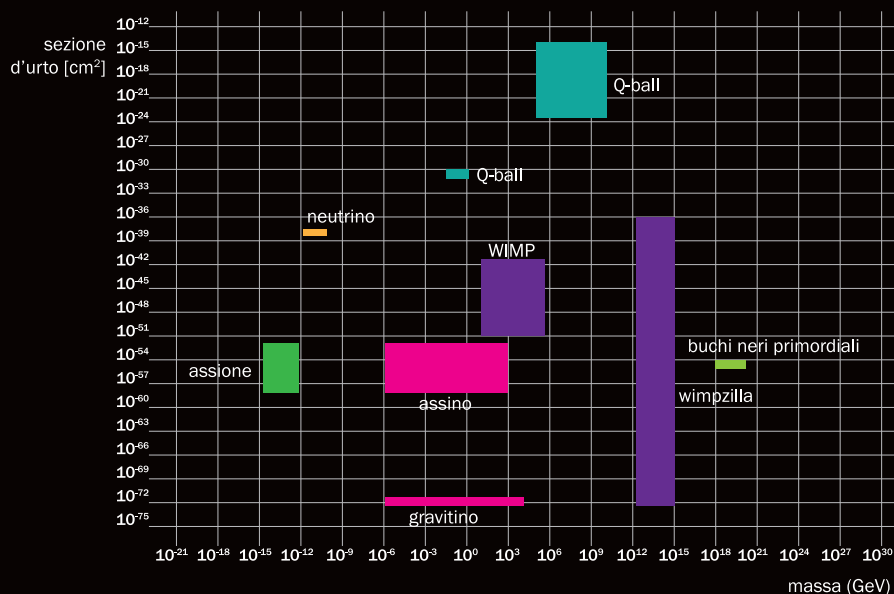
La galassia in cui viviamo, la Via Lattea, è composta da un disco di stelle e gas, visibile nel cielo a occhio nudo come una striscia luminosa, e da grandi quantità di materia invisibile, la materia oscura, che ne supporta la struttura.

Tra questi esperimenti spiccano per dimensioni titaniche e potenziale interesse gli esperimenti Atlas e Cms del Large Hadron Collider (Lhc), grazie ai quali il bosone di Higgs è stato scoperto nel 2012. Se la materia oscura è composta da Wimp, potrebbe essere prodotta nelle collisioni tra i protoni accelerati ad altissime energie e fatti collidere al centro degli esperimenti Atlas e Cms. Tutte le particelle note lasciano una traccia nei sensori di questi due esperimenti, ma non le Wimp, che scomparirebbero senza lasciare traccia, portando via una parte dell'energia della collisione e manifestando così la loro presenza (vd. p. 15, ndr).

Una seconda classe di esperimenti, detti di "rivelazione diretta", ricercano l'energia depositata da particelle di materia oscura che penetrano in essi e collidono con i nuclei atomici al loro interno. Ci sono due grossi problemi però. Il primo è che le particelle di materia oscura interagiscono debolmente, quindi gli esperimenti devono essere molto sensibili e sufficientemente grandi da permettere di rivelare un numero di eventi statisticamente significativo. Il secondo è che tantissime particelle "ordinarie", provenienti dallo spazio profondo, penetrano nel rivelatore attivandolo in continuazione. Per schermare questi raggi cosmici bisogna portare gli esperimenti in laboratori sotterranei, come i Laboratori Nazionali del Gran Sasso. Attualmente decine di esperimenti sono in funzione, tra cui l'esperimento Dama (vd. p. 37 in Asimmetrie n. 4, ndr), che ha osservato per la prima volta una modulazione annuale del numero di eventi rivelati, caratteristica aspettata per la

materia oscura, in quanto la Terra, nel suo moto annuale di rivoluzione intorno al Sole, dovrebbe sperimentare un "vento" di particelle di materia oscura con intensità variabile con la velocità della Terra rispetto alla galassia. A partire da quest'anno, un esperimento di nuova generazione, Xenon1Ton, diventerà il più sensibile al mondo. Infine, la materia oscura può essere identificata in maniera "indiretta", attraverso le particelle – ad esempio particelle di antimateria – prodotte da particolari interazioni dette di *auto-annichilazione*, in cui due particelle di materia oscura collidono, trasformando la loro massa in energia. Tra i risultati più interessanti finora ottenuti in questo settore, c'è la scoperta di un eccesso di raggi gamma, cioè di fotoni di altissima energia, osservato dal telescopio spaziale Fermi verso il centro della Galassia, che sembra avere le caratteristiche di un segnale di materia

oscura, nonché il recente risultato di Ams-02 (vd. p. 26, ndr). Oltre alle Wimp, molte altre soluzioni sono state proposte per spiegare la materia oscura. Ipotesi come assioni, neutrini sterili, *particelle specchio* e molte altre con nomi ancora più esotici popolano gli articoli scientifici (vd. fig. b), ricordando un po' quegli antichi bestiari medievali popolati di creature mitologiche e immaginarie. Proprio come alcuni di quei "mostri" si rivelarono essere versioni, sia pur distorte, di animali reali, la scienza moderna cerca tra le particelle immaginate dai fisici teorici di tutto il mondo quelle che spiegherebbero il mistero della materia oscura nell'universo. E mentre ci inoltriamo in questo viaggio sospeso tra l'infinitamente piccolo e l'infinitamente grande, impariamo ogni giorno qualcosa in più sulla struttura ed evoluzione dell'universo e sul ruolo che abbiamo in esso.



Biografia

Gianfranco Bertone è professore e coordinatore del centro di eccellenza in Astroparticelle e Gravitazione dell'Università di Amsterdam. È autore del libro *Behind the Scenes of the Universe* e dell'app *Dark Matter* disponibile su iTunes ad esso collegata.

Link sul web

http://www.lescienze.it/topics/news/materia_oscura-711451/

http://www.lngs.infn.it/lngs_infn/contents/lngs_it/public/educational/physics/dark_matter/

<http://www.perimeterinstitute.ca/videos/behind-scenes-universe-higgs-dark-matter>

b.

I fisici teorici hanno proposto diversi possibili candidati a ricoprire il ruolo di materia oscura. Il grafico ne riporta alcuni, mostrando per ognuno di questi i possibili valori della massa, riportata sull'asse orizzontale, e della probabilità di interazione con la materia ordinaria, misurata dalla *sezione d'urto*, riportata sull'asse verticale. I candidati ricercati più attivamente sono le Wimp.

Notizie dalla stazione spaziale

Antimateria e materia oscura al vaglio di Ams

di Bruna Bertucci



a.
Un *selfie* scattato in orbita da un astronauta: in alto a sinistra è visibile l'esperimento Ams-02 installato sulla struttura della Iss.

“[...] dobbiamo considerare un puro caso, che la Terra (e presumibilmente l'intero sistema solare) contenga una preponderanza di elettroni negativi e di protoni positivi. Tuttavia, è possibile che per alcune stelle valga il contrario, ossia che esse siano costituite principalmente da positroni (elettroni positivi, ndr) e protoni negativi...”. Terminò così, Paul Dirac, il discorso in occasione del conferimento del premio Nobel il 12 dicembre del 1933.

La conclusione del discorso di Dirac rappresenta idealmente il punto di partenza per l'avventura dell'Alpha Magnetic Spectrometer (Ams-02), a cui partecipano per l'Italia l'Infn e l'Asi (Agenzia Spaziale Italiana), uno strumento che ora si trova sulla Stazione Spaziale Internazionale (Iss) concepito per cercare proprio i deboli segnali di antiparticelle di materia nel flusso ininterrotto dei raggi cosmici che popola lo spazio attorno alla Terra.

La ricerca di questi segnali che appartengono all'infinitamente piccolo può infatti fornire gli indizi necessari a risolvere alcuni dei misteri ancora insoluti dell'infinitamente grande: l'universo.

Il primo mistero è legato alla predominanza di particelle di “materia” attorno a noi (la bariogenesi): dove sono finite le particelle di antimateria? Nei primi istanti di vita dopo il Big Bang siamo infatti portati a supporre che l'universo fosse “simmetrico”, ossia popolato in egual misura di particelle elementari di materia e delle loro antiparticelle. La loro naturale e violenta annichilazione ha apparentemente condotto alla scomparsa dell'intera popolazione di antiparticelle e l'universo si sarebbe quindi evoluto a partire dalle particelle di materia – una

parte su un miliardo – sopravvissute all'annichilazione. Non esistono ad oggi giustificazioni teoriche sufficienti a spiegare la nascita di quest'asimmetria. Trovare quindi dei nuclei di anti-elio o di elementi più pesanti, che non possono essere prodotti naturalmente in un universo fatto di sola materia, aprirebbe un nuovo scenario in cui l'antimateria non sarebbe scomparsa, ma solo confinata in regioni dell'universo lontane dalla Terra. Il secondo mistero è la natura della materia che compone il nostro universo. Solo il 5% del contenuto di massa-energia del nostro universo è attribuibile alla materia ordinaria di cui siamo fatti, sostanzialmente protoni, neutroni ed elettroni, mentre circa il 22% è rappresentato da particelle di materia oscura, nuove specie di particelle elementari debolmente interagenti con la materia ordinaria e quindi "invisibili" ai telescopi sensibili alla luce prodotta dalle interazioni elettromagnetiche della materia. Ma da rare collisioni di particelle di materia oscura (che scontrandosi tra di loro si auto-annichilano), possono essere generati fotoni, particelle e antiparticelle di materia ordinaria (elettroni/positroni,

protoni/antiprotoni), il cui flusso si sovrappone a quello dei raggi cosmici. Pur esistendo diverse teorie e ipotesi sulla natura della materia oscura e molte incertezze sul numero di collisioni attese, in tutti gli scenari possibili i flussi di particelle prodotti dalle collisioni di materia oscura sono di diversi ordini di grandezza più piccoli rispetto a quelli delle particelle dei raggi cosmici, prevalentemente protoni, nuclei di elio ed elementi più pesanti con una piccola percentuale (1%) di elettroni. L'unica speranza per individuare un segnale di materia oscura sono i flussi di antiparticelle, particolarmente deboli nei raggi cosmici ordinari. Abbondanze di circa un antiprotone ogni 10.000 protoni e di un positrone ogni 10 elettroni sono attese a causa delle collisioni dei raggi cosmici con il mezzo interstellare: questi flussi possono essere paragonabili a quelli attesi dalla materia oscura e costituiscono quindi un "fondo" contro cui lottare ad armi pari nella caccia a nuovi fenomeni.

Sperimentalmente, la prima sfida nel cercare segnali deboli come le particelle di antimateria richiede di intercettare i

raggi cosmici prima che essi abbiano la possibilità di interagire con l'atmosfera terrestre, generando un flusso di particelle di antimateria che potrebbero falsare la misura. Per questo motivo i rivelatori dedicati a questo tipo di ricerca sono inviati negli strati superiori dell'atmosfera con palloni aerostatici o messi in orbita nello spazio con satelliti, come Pamela o Fermi, o a bordo della Iss, come Ams-02.

La seconda sfida è quella di riuscire a raccogliere un campione significativo di particelle. Il numero di antiparticelle atteso alle energie interessanti per identificare nuovi fenomeni è di poche centinaia di eventi all'anno per superfici esposte dell'ordine del metro quadro. Tuttavia, i limiti di peso e potenza elettrica per far funzionare uno strumento nello spazio impediscono di aumentare a piacimento le dimensioni degli apparati. Pertanto, l'unica alternativa è quella di progettare strumenti in grado di operare con alta efficienza per anni.

Ma il punto fondamentale è quello di riuscire a identificare con precisione le rare antiparticelle: un elettrone o un



b.
L'esperimento Ams-02 al Kennedy Space Center della Nasa poco prima del suo inserimento nel vano di carico dello Shuttle Endeavour.

protone differiscono dalle loro antiparticelle solo per il segno della carica elettrica. Solo l'effetto di un campo magnetico, in grado di curvare in direzioni opposte particelle positive e negative può separare particelle e antiparticelle. Allo stesso tempo, un positrone e un protone hanno entrambi lo stesso valore della carica elettrica, positiva, ma c'è solo un positrone ogni 1000 protoni. Per separare le due specie, come pure per separare gli antiprotoni dai più abbondanti elettroni, è necessario sfruttare le differenti maniere con cui le due specie interagiscono con la materia.

L'esperimento Ams-02 è stato quindi concepito come uno spettrometro magnetico, il cui cuore è formato da un magnete permanente e un rivelatore di tracce costituito da circa 6,4 m² di sensori a microstrip di silicio organizzati in nove differenti strati, in grado di misurare la posizione delle particelle che attraversano l'apparato con un'accuratezza di 10 micrometri. Altri cinque strumenti completano l'apparato, per definire con precisione l'identità delle particelle che lo attraversano mediante misure complementari e indipendenti.

Le tecniche utilizzate e la complessità dell'apparato sono comparabili a quelle dei più moderni strumenti operanti negli acceleratori di particelle, ma adattate per operare in un ambiente spaziale. Ams-02 opera continuamente, dal maggio 2011, a bordo della stazione spaziale internazionale, in orbita a circa 400 km dalla superficie terrestre, assorbendo una potenza complessiva di 2kW – meno di una lavatrice! Le dimensioni dell'apparato di 3 metri di larghezza per 3 metri di lunghezza e 5 metri di altezza, con un peso complessivo di circa 7 tonnellate, lo rendono un gigante nello spazio, ma corrispondono a una piccola frazione del tipico esperimento

che opera in Lhc. Il controllo dell'esperimento avviene a distanza, mediante la rete satellitare della Nasa, che permette di comunicare con la Isp e attraverso cui vengono anche scaricati i dati dei suoi circa 300.000 canali di elettronica.

Nella sala di controllo del Cern e nella sua gemella a Taiwan, i fisici di turno verificano 24 ore su 24 che non ci siano problemi nell'apparato e reagiscono in tempo reale, aggiustando i parametri di controllo dell'esperimento in base alle necessità che si presentano a bordo della stazione.

Nei primi trenta mesi di presa dati, Ams-02 ha raccolto i segnali provenienti da circa 40 miliardi di particelle cosmiche, una statistica superiore a quella accumulata dall'insieme di tutti gli esperimenti condotti nel corso del secolo che ci separa dalla scoperta dei raggi cosmici. Tra queste particelle, sono stati identificati circa 10 milioni di elettroni e circa un milione di positroni, con cui è stata effettuata la misura del rapporto tra i positroni sull'insieme di elettroni e positroni, raggiungendo un limite di energie finora inesplorato per questi componenti della radiazione cosmica. Questo risultato conferma un eccesso di positroni rispetto alle abbondanze naturali aspettate nei raggi cosmici, come già osservato in precedenza da Pamela e nei primi 18 mesi di operazione di Ams-02, estendendo l'intervallo di energia misurata e migliorandone la precisione. Ciò è di estrema importanza per tracciare un identikit di possibili sorgenti di antimateria. Una di queste sorgenti potrebbero essere proprio le collisioni di materia oscura (vd. approfondimento).

Ma l'aumento della frazione di positroni è dovuta a una sorgente aggiuntiva di positroni o a una "sparizione" di elettroni? Lo studio del flusso separato di elettroni e positroni

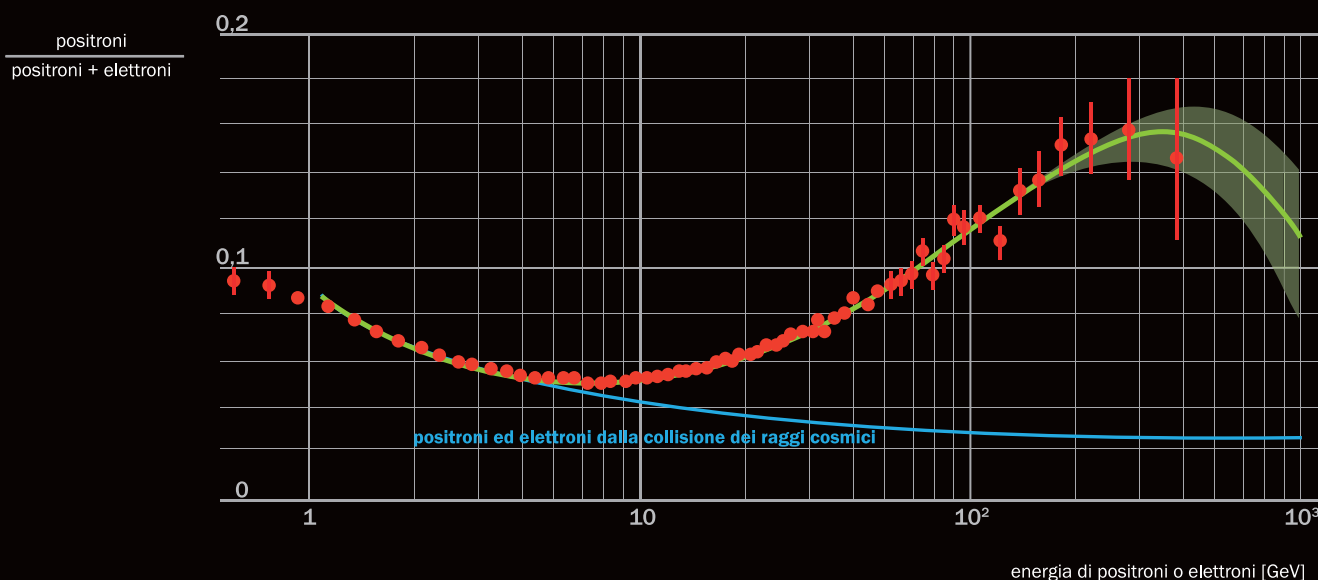


c.
Lo Shuttle Endeavour, che nel 2011 ha portato Ams-02 sulla Isp, sulla rampa di lancio del Kennedy Space Center di Cape Canaveral, in Florida.

Positroni di troppo

1.

Elaborazione grafica della misura effettuata da Ams-02 della frazione di positroni rispetto alla somma di elettroni e positroni (punti rossi). In azzurro l'andamento atteso dai raggi cosmici. La curva verde è quella che meglio descrive i dati sperimentali.



Come si vede in fig. 1, la frazione di positroni osservata da Ams-02 cresce rapidamente a partire da un'energia di 8 GeV, indicando l'esistenza di una nuova sorgente di questa componente di antimateria, rispetto a quanto previsto dalla produzione "standard" di positroni nella radiazione cosmica. L'eccesso osservato di positroni appare *isotropo* (cioè ha la stessa intensità qualunque sia la direzione di osservazione) entro un'incertezza del 3%, suggerendo che non ci siano direzioni particolari da cui nasce questo eccesso di positroni. Un'analisi

dettagliata della frazione di positroni con l'energia mostra un andamento graduale del suo tasso di crescita, escludendo variazioni improvvise, picchi o avvallamenti, e sembra indicare il raggiungimento di un valore massimo a energie attorno ai 275 GeV. Continuando l'osservazione nei prossimi anni, la misura sarà estesa a energie ancora superiori e questo potrà aiutarci a migliorare la comprensione della natura del fenomeno osservato e descriverne ancora più accuratamente le sue caratteristiche.

ne caratterizza con estrema precisione l'andamento con l'energia. I risultati indicano chiaramente che non ci sono brusche variazioni spettrali del flusso di elettroni, confermando quindi che l'andamento con l'energia della componente dei positroni richiede la presenza di nuovi fenomeni per la loro produzione.

Queste osservazioni sono interpretabili con il flusso di positroni generato nelle collisioni di particelle di materia oscura (in particolare, i neutralini) di massa dell'ordine di 1 TeV.

Tuttavia, per stabilire se l'origine dell'eccesso dei positroni è realmente legata alla materia oscura o se sia dovuto a sorgenti astrofisiche, ad esempio pulsar vicine al nostro pianeta, dovrà essere determinato il tasso di decrescita della frazione (vd. fig. 1)

e confrontato l'effetto osservato con quello misurato in altre componenti di antimateria, ad esempio gli antiprotoni. D'altra parte, la missione di Ams-02 è solo all'inizio, e si prevede che l'esperimento continuerà la sua presa dati durante tutta la vita operativa della Iss, quindi ancora un decennio di osservazioni e misure lo attendono, per proseguire la caccia all'antimateria e osservare o definitivamente escludere la presenza di anti-elio nel nostro universo. Allo stesso tempo, le misure di composizione e di spettro energetico dei raggi cosmici ordinari permetteranno di avanzare nello studio delle loro sorgenti e dei meccanismi con cui giungono a noi attraversando la galassia, l'eliosfera e la magnetosfera terrestre.

Biografia

Bruna Bertucci è professore di fisica presso l'Università di Perugia. La sua attività di ricerca nasce nel campo delle particelle elementari alla fine degli anni '80 con la partecipazione agli esperimenti del Lep del Cern. Dalla fine degli anni '90 si dedica prevalentemente allo studio sperimentale dei raggi cosmici nello spazio, prima con l'esperimento Ams-01 e quindi con Ams-02, di cui è attualmente responsabile italiano.

Link sul web

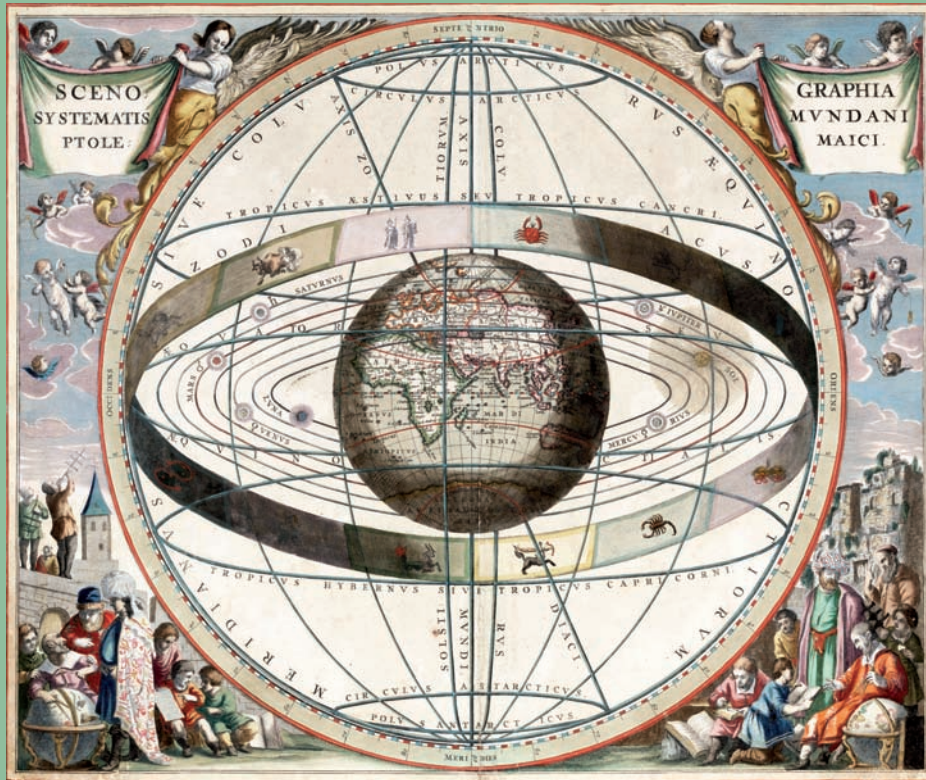
www.ams02.org

<http://www.asdc.asi.it/>

... che muove il Sole e l'altre stelle

Costante cosmologica, energia oscura ed espansione dell'universo

di Luca Amendola



a.
Il sistema geocentrico (o tolemaico) perfezionato nel *De Caelo* da Aristotele, che ne diede un inquadramento concettuale quasi universalmente accettato per circa due millenni dai dotti, per i quali il cosmo era un'entità statica, eterna e immobile nella sua struttura.

Nelle prime pagine del *De Caelo*, Aristotele, come chissà quante altre persone prima di lui, si pone una domanda del tutto naturale: perché il cielo e gli astri non ci cadono addosso? Ma essendo egli Aristotele e non un nottambulo distratto, si chiede anche subito dopo: perché gli astri non si allontanano da noi? L'idea che l'universo potesse essere un sistema in evoluzione si affacciava così per la prima volta nella galleria delle grandi idee. Ma come diceva Bohr, il

contrario di una grande idea è un'altra grande idea. Per i due millenni successivi, filosofi, teologi e i primi scienziati moderni si trovarono quasi tutti concordi nell'affermare che il cosmo era in realtà un'entità statica, eterna, immobile nella sua struttura.

Einstein stesso, nei suoi primi lavori dedicati alla cosmologia, non riuscì a fare meglio di Aristotele, quasi ripetendone le stesse parole: il cielo è immutabile, quindi l'universo è statico. Ma essendo egli Einstein, e non un vacuo sofista, capì rapidamente che per mantenere statico l'universo occorreva escogitare il modo di resistere alla forza universale della gravità. Poiché la gravità è sempre attrattiva e agisce su ogni particella, partendo da una distribuzione statica la materia è destinata a collassare su se stessa. La soluzione immaginata da Einstein nel 1917, la famosa *costante cosmologica*, iniziò così la sua luminosa e poliedrica carriera. Pochi anni dopo, alcuni astronomi, Edwin Hubble in testa, scoprirono che l'universo si espande o, più correttamente, che tutte le galassie possiedono un moto che le allontana sempre di più l'una dall'altra. La cosmologia moderna, basata finalmente su dati e non su elucubrazioni, aveva ufficialmente inizio.

Per spiegare un'espansione non accelerata, come quella che le osservazioni sembravano allora richiedere, la costante cosmologica non era però necessaria e l'idea di Einstein rimase dormiente per qualche decennio. Dormiente ma non dimenticata, perché, anche se non richiesta, la costante cosmologica è come un genio della

lampada: una volta uscita, non vuole più rientrare. Secondo la fisica quantistica dei campi la costante cosmologica è una proprietà intrinseca del vuoto e non c'è nessuna ragione evidente per ritenere che sia nulla. Tutt'altro: conti che si possono fare sul tradizionale tovagliolo del bar mostrano che questa "energia del vuoto" dovrebbe avere un valore gigantesco, tale da far immediatamente "esplodere" o collassare l'intero universo. Conti, ammettiamolo, piuttosto azzardati, ma indicativi del fatto che c'è qualcosa di profondo nella costante cosmologica che ci sfugge completamente.

Il più spettacolare *come-back* nella storia della fisica irrompe inatteso nel 1998. Due gruppi di astronomi e fisici, guidati da Saul Perlmutter, Brian Schmidt e Adam Riess, pubblicano i risultati di una ricerca durata quasi un decennio. Proprio come Hubble cinquant'anni prima, i due gruppi avevano misurato velocità e distanza di oggetti lontanissimi, non galassie stavolta, ma supernovae dette *di tipo Ia*, osservabili fino a distanze mille volte superiori a quelle di Hubble. Queste supernovae esplodono quando raggiungono una soglia fissa, detta *massa di Chandrasekhar*. La loro luminosità massima è quindi relativamente costante, indipendentemente dai dettagli dell'esplosione. Misurando il flusso luminoso che giunge ai nostri telescopi,

possiamo stimare in maniera diretta la distanza delle sorgenti, perché il flusso percepito decresce con l'inverso del quadrato della distanza, con opportune correzioni dovute all'espansione cosmica. La conclusione dei due gruppi di ricerca fu sconvolgente: i dati mostravano chiaramente un universo in accelerazione, inspiegabile senza una costante cosmologica o qualcosa che gli somigliasse molto. Una nuova inflazione cosmica (vd. in *Asimmetrie* n. 15 p. 37, ndr) dunque, non più persa nel lontanissimo passato, ma fiorente proprio sotto i nostri occhi.

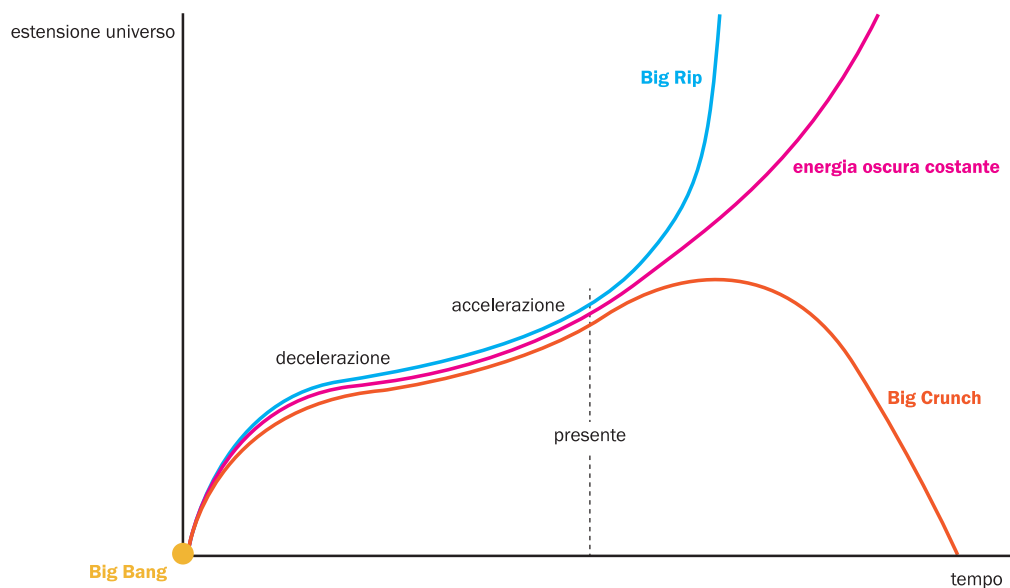
In quell'avverbio, "chiaramente", è stata in realtà immeritatamente compressa un'infinità di diabolici dettagli. Prima di poter giungere alla costante cosmologica (e al Nobel assegnato a Perlmutter, Schmidt e Riess nel 2011) fu necessario un enorme lavoro di controllo dei risultati e di tutte le possibili spiegazioni alternative.

La costante cosmologica, indicata universalmente con il simbolo Λ , ha molte misteriose proprietà. La più importante è che si tratta di una forma di energia che non si diluisce con l'espansione, ma che resta, appunto, costante. Questa è una conseguenza di un'altra inusuale caratteristica, la sua forte pressione negativa. In relatività generale, la pressione esercita una forza di gravità proprio come la massa.

Essendo negativa, la forza che ne risulta accelera l'espansione, invece di rallentarla come fanno la materia ordinaria e la materia oscura. Una sorta di antigravità, quindi, anche se non molto pratica per gli scrittori di fantascienza, perché, essendo assolutamente omogenea, non può essere modellata a piacimento per farne antipianeti, antistelle e motori antigravitazionali.

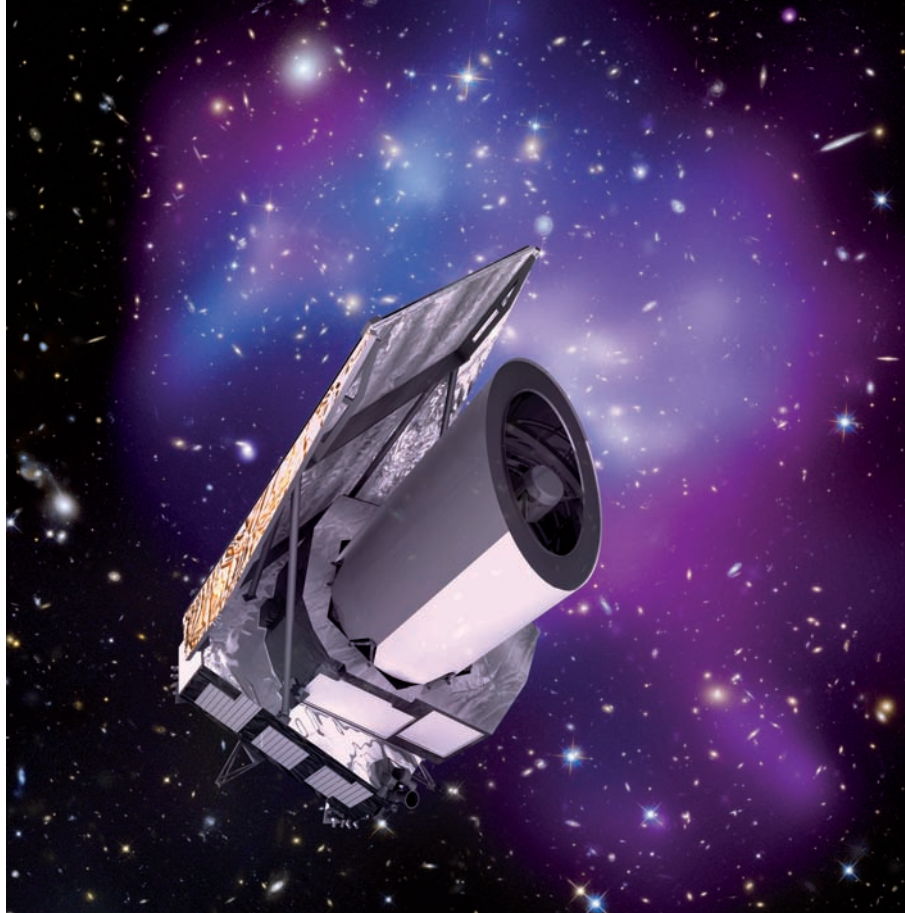
Una conseguenza immediata del suo valore indipendente dal tempo è che la costante cosmologica continuerà ad accelerare l'espansione per sempre, anche quando la densità di materia e la radiazione saranno scese a livelli impercettibili. Oggi si stima che la costante Λ sia responsabile del 73% dell'energia dell'universo e che questa percentuale è destinata ad aumentare nei prossimi miliardi di anni a causa dell'espansione dell'universo.

I risultati delle supernovae vennero presto confermati da molte altre osservazioni, da quelle della radiazione cosmica di fondo alle perturbazioni nella distribuzione delle galassie. Ma per quanto sempre più precisi, i dati non permettono ancora di stabilire una volta per tutte se la costante Λ sia l'unica spiegazione possibile. Nel varco aperto da questa incertezza, e forti dei problemi fondamentali che la fisica quantistica associa all'energia del vuoto, i cosmologi hanno prodotto molte altre interessanti ipotesi.



b.

L'evoluzione delle distanze cosmiche dal momento del Big Bang iniziale. Dopo la fase iniziale inflazionaria (qui non illustrata), e quella rallentata, lo spazio inizia a espandersi in modo accelerato sotto l'azione dell'energia oscura. Tra le ipotesi sull'andamento futuro, sono qui illustrate il collasso finale (Big Crunch) e il Big Rip, una espansione talmente veloce da distruggere tutte le strutture fisiche, dalle stelle agli atomi.



Come l'inflazione cosmica primordiale può essere stata indotta da una "particella", o meglio un campo, chiamato *inflatone*, così l'accelerazione recente potrebbe essere dovuta, invece che alla costante cosmologica, al lavoro nascosto di un campo/particella chiamato *energia oscura* o *quintessenza* (riecco Aristotele!) o semplicemente *campo scalare*. Come tutti i campi, esso si estende e si propaga in tutto lo spazio e ha una sua dinamica. Come tutte le particelle, l'energia oscura possiede anche una massa, anche se talmente minuscola da non essere direttamente misurabile con alcun acceleratore: la sua lunghezza d'onda associata la rende infatti una

particella veramente impalpabile, distribuita su distanze pari all'intero universo.

L'energia oscura o quintessenza assomiglia alla costante cosmologica, ma non è esattamente costante e quindi la sua densità varia lentamente nel tempo e può perfino fluttuare e addensarsi leggermente nello spazio.

C'è infine un'altra suggestiva possibilità: che l'accelerazione dell'espansione dell'universo sia dovuta in realtà a una nuova *forza oscura*, in grado di esercitare la sua azione direttamente sulla materia, proprio come la gravità, il campo elettromagnetico o le due forze nucleari fondamentali. Questa "quinta forza"

sarebbe quasi indistinguibile dalla gravità stessa, tanto da essere anche denominata *gravità modificata*. Le conseguenze di una gravità modificata potrebbero essere innumerevoli: l'intera epopea dell'universo dovrebbe essere riscritta tenendo conto di un nuovo potente fattore, ben al di là della semplice costante cosmologica.

Tutte queste ipotesi sono al centro degli sforzi osservativi e teorici della cosmologia. Una delle imprese più ambiziose è il satellite Euclid dell'Esa, con ampia partecipazione italiana, il cui lancio è previsto per il 2020. Euclid sarà un telescopio dedicato alla cosmologia capace di catalogare in cinque anni gli spettri (e quindi la distanza attraverso il *redshift*) di cinquanta milioni di galassie e le immagini di altre due miliardi, creando un'accurata mappa cosmica tridimensionale in un volume pari a un cubo il cui lato misura miliardi di anni luce. La distribuzione delle galassie sarà confrontata con quella predetta dalle varie teorie dell'energia oscura e combinata con tutti i dati che via via si renderanno disponibili. Il risultato sarà una misura altamente precisa di tutti i principali parametri cosmologici, inclusa la densità di materia ed energia oscura, la massa dei neutrini, lo spettro delle fluttuazioni inflazionarie primordiali, il tasso di espansione a varie distanze. La speranza è che nelle pieghe della mappa di Euclid possiamo finalmente leggere l'identità della costante cosmologica o energia oscura o gravità modificata. La certezza è che Euclid e gli altri esperimenti simili ci forniranno una visione estesa e allo stesso tempo profonda del nostro universo e ci aiuteranno a capire finalmente perché mai il cielo non ci cada sulla testa.

c.
Immagine artistica del satellite Euclid.

Biografia

Luca Amendola è stato ricercatore astronomo all'Istituto Nazionale di Astrofisica (Inaf, Osservatorio di Roma) fino al 2009 ed è attualmente professore di fisica teorica presso l'Università di Heidelberg (Germania). Ha passato periodi di ricerca al Fermilab di Chicago, in Francia, Germania, Giappone. È autore di un libro divulgativo (*Il Cielo Infinito*, Sperling).

Link sul web

<http://science.nasa.gov/astrophysics/focus-areas/what-is-dark-energy/>

http://hubblesite.org/hubble_discoveries/dark_energy/de-what_is_dark_energy.php

<http://sci.esa.int/euclid/42267-science/>

<http://www.focus.it/cultura/che-cosa-sono-la-materia-e-l-energia-oscura>

Il Cern fa scuola.

di Catia Peduto

a.
Alcuni vincitori della competizione
A beamline for schools del 2014
davanti alla linea di fascio T9 al
Cern nel settembre scorso.



È giunta alla seconda edizione la competizione del Cern “Una linea di fascio per le scuole” (*A beamline for schools*), che offre agli studenti delle scuole superiori di tutto il mondo la possibilità di partecipare a un vero e proprio esperimento, utilizzando un fascio di particelle di uno degli acceleratori del Cern.

Al concorso sono ammesse squadre di un massimo di 30 studenti, che abbiano compiuto i 16 anni di età e che siano coordinate da almeno un adulto. L'iter di approvazione per vincere la competizione rispecchia quello che vale per ogni collaborazione di ricerca. Entro fine gennaio di ogni anno le squadre desiderose di partecipare devono registrarsi sul sito del Cern, inviando una lettera motivazionale. Proprio come per le vere collaborazioni di ricerca, se questa viene accettata dal comitato scientifico, entro fine marzo la squadra deve formulare una proposta per un esperimento da fare con il fascio (in gergo, *linea di fascio*) che il Cern mette a disposizione, composta di una parte

scritta in inglese e un video. Per aiutare insegnanti e studenti a partecipare, il Cern introduce i concetti di base relativi ai fasci e alle particelle attraverso dei video pubblicati online e dei *hangout* sul social network Google+. In caso di vincita, nove studenti della squadra potranno recarsi per una settimana come ospiti al Cern durante l'estate e condurre l'esperimento che hanno ideato. Successivamente, i restanti componenti della squadra potranno partecipare all'analisi dei dati. Come premio di consolazione per le squadre che non vincono, invece, c'è la possibilità di avere la precedenza nel caso volessero andare in visita al Cern, partecipare alle Masterclass (vd. *Asimmetrie* n. 4 p. 47, ndr) oppure (per gli insegnanti coinvolti) iscriversi ai programmi di formazione specifici del Cern.

Alberta Boato, professoressa di scienze del liceo scientifico Angelo Messedaglia di Verona, l'anno scorso ha coordinato quattro squadre di ragazzi. “Ho visto l'avviso del concorso sul sito del Cern una settimana prima della scadenza. Allora ho

messo un post sulla pagina Facebook degli studenti e nel giro di tre giorni si sono costituite le squadre”, ci racconta la professoressa. “È stata un'esperienza molto intensa e travolgente fin da subito e l'entusiasmo dei ragazzi e la loro fantasia un vero fiume in piena!”. Delle 300 proposte arrivate al Cern nel 2014, 85 erano italiane (un record assoluto sulle altre nazioni). Ad esempio, la squadra *Mixedmess* del liceo veronese ha proposto di usare il fascio per produrre neutrini con cui irraggiare un isotopo a vita breve, mentre la squadra *Girlspower* avrebbe voluto provare a selezionare un fascio molto sottile di protoni per indagare la composizione dei minerali inclusi all'interno dei diamanti in maniera non distruttiva. *Mixedmess* e *Girlspower* non ce l'hanno fatta. Altre tre squadre italiane sono entrate nella finalissima, ma il premio è andato a una greca, che aveva proposto di investigare il decadimento dei pioni per studiare l'interazione debole, e una olandese, che proponeva la crescita di cristalli per realizzare un calorimetro da testare nel fascio del Cern.

Misteri sfuggenti

Massa e natura dei neutrini

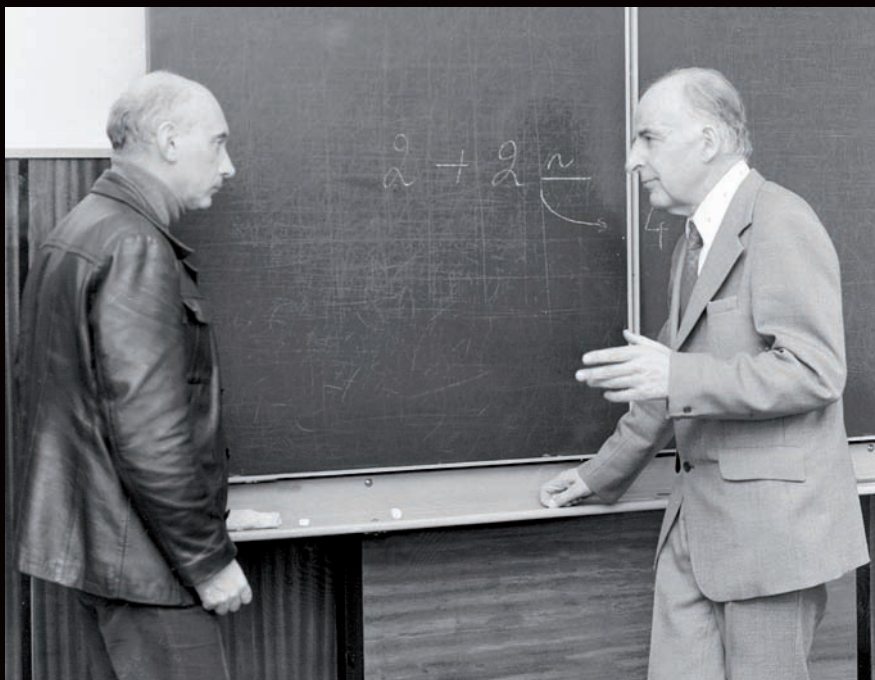
di Carlo Giunti



a.
Clyde L. Cowan e Frederick Reines (da sinistra) con il rivelatore con cui hanno osservato per la prima volta un neutrino a Hanford (Washington) nel 1956.

I neutrini sono le particelle elementari conosciute più misteriose. Fanno parte delle particelle fondamentali del modello standard e le loro caratteristiche di interazione ne hanno determinato, storicamente, la formulazione, ma a tutt'oggi, ottantacinque anni dopo l'ipotesi di Wolfgang Pauli e cinquantanove anni dopo la prima osservazione sperimentale da parte di Clyde L. Cowan e Frederick Reines (vd. approfondimento), non si conoscono ancora alcune delle loro proprietà fondamentali: il valore delle masse, la loro natura (se si tratta di cosiddetti neutrini *di Dirac* o *di Majorana*) e il loro numero (cioè se ci sono dei neutrini non-interagenti detti sterili, in aggiunta ai tre neutrini interagenti conosciuti, *elettronico*, *muonico* e *del tau*, detti *attivi*). Ci sono inoltre buoni motivi per pensare che le caratteristiche sconosciute dei neutrini siano legate a una nuova fisica oltre il modello standard. Una quantità di fondamentale importanza per ogni particella, come per ogni corpo, è la sua massa, che ne determina le proprietà di propagazione e interazione. Attualmente conosciamo il valore delle masse di tutte le particelle del modello standard eccetto dei neutrini, le cui masse sono talmente piccole, che fino a circa quindici anni fa non esisteva neanche una prova inconfutabile del fatto che la loro massa fosse non nulla. Questa prova è arrivata dall'osservazione dell'*oscillazione dei neutrini*, il mescolamento tra neutrini di diverso tipo (o *sapore*) che porta, ad esempio, alla trasformazione di un neutrino elettronico in muonico. Il fenomeno, proposto indipendentemente negli anni '60 da Pontecorvo e da Ziro Maki, Masami Nakagawa e Shoichi Sakata, dipende dalla distanza percorsa dal neutrino, dalla sua energia e dalla differenza di massa.

Positroni di troppo



1.
Bruno Pontecorvo (a destra), uno dei famosi "ragazzi di Via Panisperna", in una conversazione con il suo collaboratore Samoil Bilenky. Pontecorvo ipotizzò l'esistenza di un secondo tipo di neutrino nel 1960.

Nel 1930 Pauli propose l'esistenza del neutrino per spiegare il fatto che nei decadimenti nucleari dovuti all'interazione debole (che avvengono con tempi molto più lenti di quelli dovuti alle interazioni forte ed elettromagnetica) gli elettroni vengono emessi con uno spettro continuo di energia. Questo è possibile solamente se i prodotti finali del decadimento sono almeno tre: il nucleo finale, l'elettrone e un neutrino, che ha a lungo eluso i tentativi di osservazione, perché è elettricamente neutro e interagisce con la materia solamente attraverso le interazioni deboli (mentre particelle cariche come l'elettrone lasciano tracce nei rivelatori dovute alla ionizzazione degli atomi). L'ipotesi di Pauli permise la formulazione della teoria delle interazioni deboli da parte di Enrico Fermi nel 1934, che però prevedeva che le interazioni dei neutrini fossero talmente deboli che sarebbe stato molto difficile, e forse impossibile, verificare direttamente la loro esistenza. Per fortuna questa previsione pessimistica è stata smentita grazie al fatto che ci sono sorgenti di neutrini che ne producono un flusso enorme: ad esempio, un tipico reattore nucleare produce circa 10^{20} neutrini al secondo per ogni gigawatt di potenza termica e dal Sole ci arriva un flusso di circa 10^{11} neutrini al secondo per centimetro quadrato (circa la superficie di un'unghia). Perciò anche se la maggior parte dei neutrini attraversa un rivelatore come se fosse trasparente, dato l'enorme flusso di neutrini si possono osservare alcune interazioni che rivelano l'esistenza di queste particelle. Questa misura è stata

fatta per la prima volta da Cowan e Reines nel 1956 utilizzando un rivelatore, posto vicino a un reattore nucleare.

La misura di Cowan e Reines ha stabilito definitivamente l'esistenza di un neutrino elettronico emesso insieme a un elettrone nei decadimenti nucleari che avvengono all'interno di un reattore. Nel frattempo però nel 1937 era stato scoperto il muone, che è una particella carica simile all'elettrone, ma circa 200 volte più pesante. Bruno Pontecorvo ipotizzò nel 1960 l'esistenza di un secondo tipo di neutrino che viene prodotto in associazione con un muone. Questa previsione è stata brillantemente confermata nel 1962 dall'esperimento di Leon Lederman, Melvin Schwartz e Jack Steinberger, che dimostrarono che i neutrini prodotti da interazioni deboli insieme a muoni non producono elettroni quando interagiscono con la materia, come farebbero invece i neutrini elettronici. Essi sono quindi delle particelle diverse, dette neutrini muonici. In seguito, è stato scoperto nel 1975 un terzo leptone carico chiamato tau, che è il fratello più pesante dell'elettrone e del muone (circa 17 volte più pesante del muone) e il corrispondente neutrino del tau è stato osservato nel 2000. Questo completa la lista dei tre neutrini conosciuti, che sono attivi nei processi di interazione debole che ne hanno permesso la rivelazione. Resta aperta la possibilità dell'esistenza di ulteriori tipi di neutrini, detti sterili, che non sono associati a una particella carica del modello standard.

Dalle misure di oscillazione conosciamo le differenze tra la massa di neutrini diversi. Queste sono piccolissime e, quindi, sappiamo che essi hanno una massa, ma non è ancora stato possibile misurarne il valore assoluto. Il limite superiore stabilito sperimentalmente è di circa 250 mila volte più piccolo della massa dell'elettrone, che è la particella di materia più leggera del modello standard a parte i neutrini. La piccolezza delle masse dei neutrini rispetto alle altre particelle del modello standard richiede una spiegazione, che però non può essere trovata in maniera naturale all'interno del modello

standard stesso, perché richiederebbe l'imposizione di un vincolo artificialmente piccolo sui parametri del modello standard che determinano le masse dei neutrini. Si pensa invece che la piccolezza delle masse dei neutrini sia dovuta alla loro connessione con la nuova fisica, attraverso la proprietà dei neutrini di essere particelle di Majorana (cioè particelle che coincidono con la propria antiparticella) invece che particelle di Dirac, come invece i quark e i leptoni carichi (elettrone, muone e tau). Cerchiamo di capire meglio cosa significa.

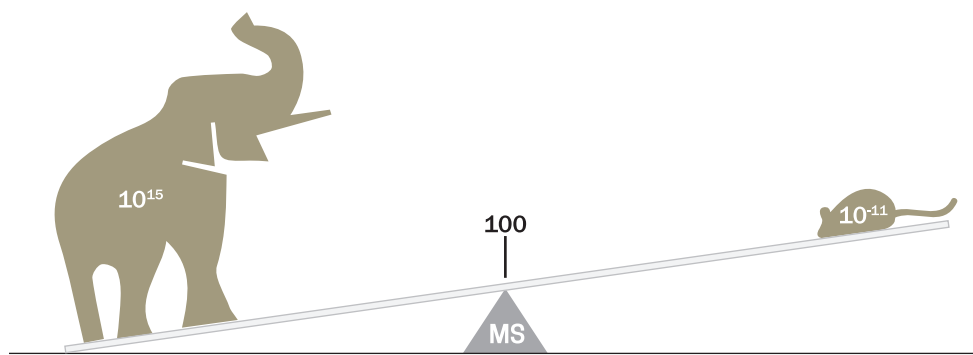
Nel 1928 Paul Dirac formulò la teoria quanto-relativistica dei fermioni, come l'elettrone, che per questo motivo sono detti *particelle di Dirac*. Una caratteristica fondamentale di una particella di Dirac è che allo stato di particella (per esempio, l'elettrone, che ha una carica elettrica negativa) corrisponde sempre uno stato di antiparticella con carica elettrica opposta (il positrone nel caso dell'elettrone, che ha una carica elettrica positiva). I quark e i leptoni carichi (elettrone, muone e tau) sono particelle di Dirac, mentre per i neutrini (che sono neutri) esiste la possibilità che siano *particelle di Majorana*, secondo la teoria sviluppata nel 1937 da Ettore Majorana. Per le particelle di Majorana lo stato di particella coincide con quello di antiparticella. Ciò è possibile solamente per particelle neutre come i neutrini, mentre per particelle cariche gli stati di particella e antiparticella sono necessariamente distinti avendo questi carica elettrica opposta. Nell'ambito del modello standard i neutrini massivi possono essere solamente particelle di Dirac, perché il meccanismo di Higgs che dà massa alle particelle può farlo solamente per particelle di Dirac. È per questo motivo che risulta estremamente interessante determinare sperimentalmente se i neutrini massivi sono particelle di Majorana, perché in questo caso le masse dei neutrini devono essere generate da un meccanismo di nuova fisica. Inoltre, se i neutrini sono

particelle di Majorana, è possibile spiegare la piccolezza delle loro masse con il meccanismo di *see-saw* (o ad altalena) che si basa sull'esistenza di una nuova fisica oltre il modello standard a una scala di energia molto grande, che può essere ad esempio la scala della teoria della grande unificazione (Gut) della forza forte con quelle elettrodeboli, ovvero dell'ordine dei 10^{15} - 10^{16} GeV, estremamente più alta della scala elettrodebole di energia, che è dell'ordine di 100 GeV, dove si verifica l'unificazione delle interazioni elettromagnetica e debole del modello standard. Secondo il meccanismo di *see-saw* (vd. fig. b) le masse dei neutrini sono proporzionali al rapporto tra il quadrato della scala di energia elettrodebole e la scala di energia Gut, il quale vale circa un centesimo di eV (10^{-2} eV), proprio il valore atteso per le masse dei neutrini.

Se i neutrini sono particelle di Majorana, quindi, le loro masse stabiliscono un legame tra la fisica del modello standard e la nuova fisica.

Gli esperimenti che sono più sensibili alle piccole masse di neutrini di Majorana sono quelli che cercano di misurare un processo estremamente raro chiamato *doppio decadimento beta senza neutrini* (vd. in Asimmetrie n. 15 p. 27, ndr) di alcuni nuclei pesanti, come ad esempio gli isotopi del germanio e del tellurio, utilizzati negli esperimenti Gerda e Cuore nei Laboratori Nazionali del Gran Sasso dell'Infn.

b.
Illustrazione del meccanismo di *see-saw* (o dell'altalena): più grande (pesante) è la scala di energia della fisica oltre il modello standard (100 GeV), rappresentata dall'elefante (come ad esempio la scala di energia della grande unificazione pari a 10^{15} GeV) e più piccole (leggere) sono le masse dei neutrini di Majorana (rappresentati dal topolino). Nel caso della scala di energia della grande unificazione, la massa del neutrino di Majorana sarebbe pari a 10^{-11} GeV.





C'è anche la possibilità che la nuova fisica si manifesti con nuove particelle molto leggere che, essendo neutre e non interagenti con la forza debole del modello standard, ci appaiono come neutrini sterili (nome inventato da Pontecorvo nel 1967). In questo caso i tre neutrini attivi, che “rispondono” all'interazione debole, attraverso la quale vengono prodotti e rivelati dai fisici, possono oscillare in neutrini sterili, che eludono la capacità di rivelazione sperimentale. Questo fenomeno potrebbe spiegare recenti indicazioni di una mancata rivelazione del flusso misurato di neutrini prodotti in reattori nucleari e in sorgenti radioattive. L'esperimento Sox, che utilizza il rivelatore Borexino ai Laboratori del Gran Sasso,

controllerà nei prossimi anni la correttezza di queste indicazioni utilizzando sorgenti radioattive di neutrini. È chiaro che questa misura è di estrema importanza per lo studio della fisica oltre il modello standard, perché un risultato positivo darebbe informazioni dirette sull'esistenza di una nuova particella, il neutrino sterile, che non appartiene al modello standard e la cui piccola massa deve essere generata da un meccanismo di nuova fisica. Lo studio delle proprietà dei neutrini, uniche tra quelle delle particelle del modello standard, offre una finestra sulla nuova fisica che è difficile aprire a causa dell'elusività dei neutrini, ma l'inventiva e la tenacia dei fisici fanno ben sperare per il futuro prossimo.

C.
Un ricercatore al lavoro
sull'esperimento Cuore nei
Laboratori Infn del Gran Sasso.

Biografia

Carlo Giunti è ricercatore dell'Infn presso la sezione di Torino. La sua attività di ricerca riguarda principalmente la fisica dei neutrini, sui quali ha scritto il libro specialistico *Fundamentals of Neutrino Physics and Astrophysics* (Oxford University Press, 2007).

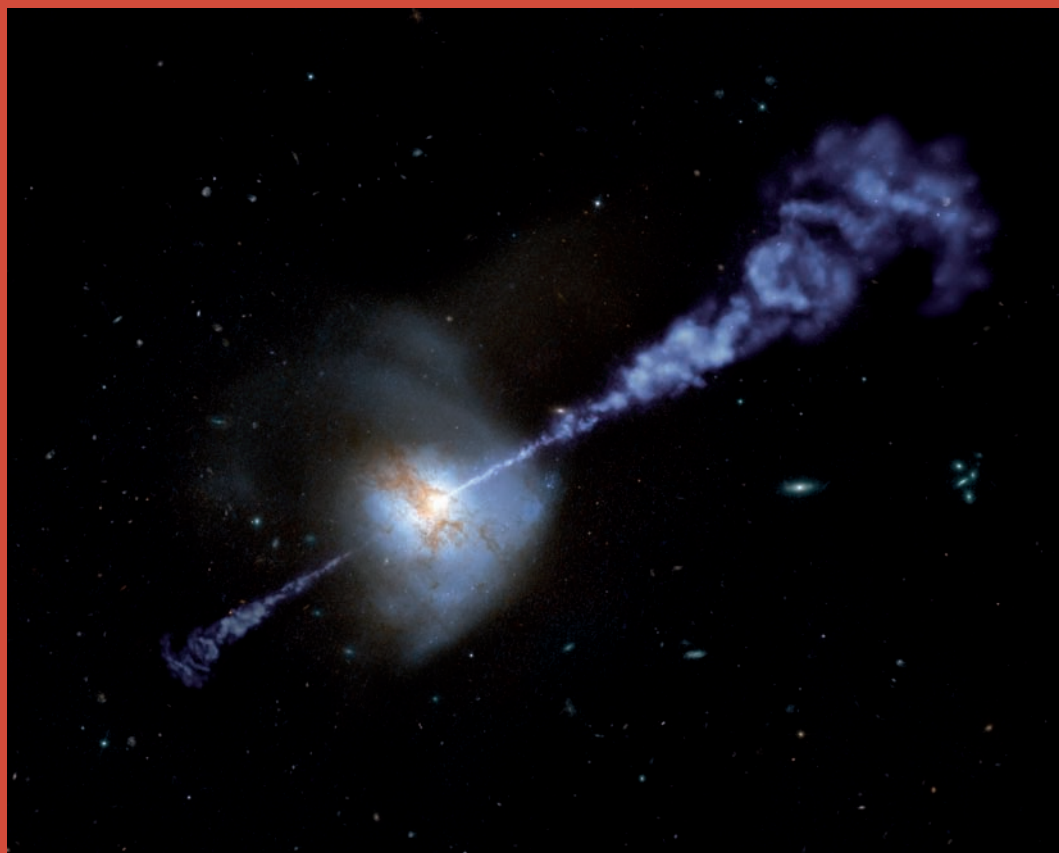
Link sul web

<http://www.nu.to.infn.it/>
<http://www.hep.anl.gov/ndk/hypertext/>
<http://pcbat1.mi.infn.it/~battist/cgi-bin/oscil/index.r>

On the rocks

Telescopi per neutrini sotto i ghiacci

di Elisa Bernardini



a.
Illustrazione artistica del nucleo galattico attivo (Agn) della galassia Arp 220. In prossimità del buco nero e all'interno dei getti possono essere accelerati raggi cosmici e prodotti neutrini fino a energie estreme.

I neutrini sono tra i rappresentanti più evanescenti del mondo delle particelle elementari. Privi di carica elettrica e dotati di una massa piccolissima, possono penetrare densi strati di materia senza lasciare traccia. Non risentendo dei campi magnetici che permeano la nostra galassia e lo spazio intergalattico, si propagano fino alla Terra su traiettorie lineari che ci connettono alle loro sorgenti. I neutrini possono rappresentare gli unici messaggeri per studiare eventi spettacolari che producono particelle di altissima energia nel nostro universo, la cui osservazione

è preclusa all'astronomia tradizionale che si basa solo sulla rivelazione di onde elettromagnetiche. La loro scoperta può aiutarci a sciogliere rompicapi quali: come esplode una stella? Cosa accade in prossimità di un buco nero? Qual è l'origine dei raggi cosmici che raggiungono la Terra (vd. Asimmetrie n. 10, ndr)?

Sebbene raramente, i neutrini interagiscono con la materia. Ed è grazie a tali collisioni che li possiamo osservare. Per i neutrini a energie di qualche milione di elettronvolt, la probabilità di interazione

nell'attraversare il diametro terrestre è dell'ordine di una parte ogni cento miliardi. Pur aumentando a energie più elevate, la rivelazione dei rari segnali di neutrini richiede volumi spropositati rispetto ai più impressionanti rivelatori di particelle in funzione al Cern di Ginevra. Sono moltissimi i neutrini che giungono sulla Terra ogni secondo. La maggior parte di essi, alle energie più basse, tra qualche migliaio e qualche milione di elettronvolt, proviene dal Sole e dalle esplosioni stellari, le cosiddette supernovae. A energie fino a circa un PeV (10^{15} eV) i neutrini sono prodotti

Rivelatori negli abissi

1.

La posa delle stringhe dell'esperimento Baikal avviene in pieno inverno, quando la superficie del lago è ghiacciata. Nella banchisa vengono scavati dei buchi larghi circa 2 metri e le stringhe vengono installate con l'aiuto di verricelli. Le diverse parti dell'apparato sono interconnesse da cavi elettrici e ottici stagni, capaci di resistere alla pressione prodotta dai circa 1500 metri di acqua che sovrasta l'apparato.



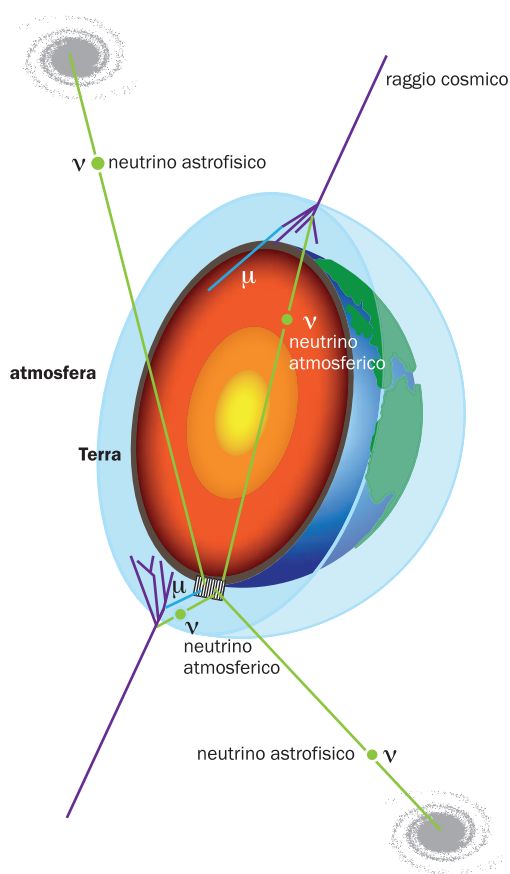
L'idea di utilizzare grandi volumi naturali come l'acqua o il ghiaccio risale già agli anni '60. In un mezzo trasparente è possibile intercettare da lunghe distanze i rapidissimi lampi di luce blu, detta *luce Cherenkov*, emessi dalle particelle cariche prodotte nella collisione di un neutrino con un nucleo della materia. Registrando i tempi di arrivo e l'intensità di questa radiazione si può risalire alla direzione di provenienza e all'energia del neutrino. I primi tentativi di immergere in grandi volumi d'acqua rivelatori ottici furono realizzati alle Hawaii negli anni '70 con l'esperimento Dumand. Sebbene poi cancellato, il progetto rappresentò un'importante avanscoperta, riproposta con più successo in Siberia (Russia) presso il lago Baikal negli anni '80 (vd. fig. 1). Sfruttando lo spesso strato di ghiaccio che facilita le operazioni di messa in acqua e manutenzione durante la stagione invernale, fu possibile installare 8 linee di supporto a 200 sensori ottici. Baikal fu il primo esperimento a rivelare sott'acqua i neutrini atmosferici. Tuttora in funzione, si prepara a un ampliamento verso la scala del

chilometro cubo (e si chiamerà Gigaton Volume Detector). Anche il mare aperto si presta come mezzo trasparente ideale alla rivelazione di neutrini e il progetto Km3net, che ha da poco deposto le prime strutture sottomarine al largo di Capo Passero in Sicilia, ambisce alla realizzazione di un telescopio di neutrini tre volte più grande di IceCube nell'emisfero Nord della terra.

I tentativi nel ghiaccio antartico non furono meno pionieristici. Amanda fu il primo esperimento ad affrontare l'avventura polare alla fine degli anni '80. Sebbene si basi su una tecnologia simile a quella di Dumand, fu necessario sviluppare metodi differenti per l'alloggiamento glaciale. I primi sensori furono installati alla profondità massima di un chilometro, dove tuttavia il ghiaccio antartico è ancora permeato di bolle d'aria che ne inficiano la trasparenza. Solo conquistando profondità maggiori fu possibile dimostrare il funzionamento nel ghiaccio alla fine degli anni '90, consegnando poi il testimone a IceCube nel 2005.

nelle interazioni dei raggi cosmici con i nuclei dell'atmosfera terrestre e vengono chiamati *atmosferici*. Anche dalle collisioni che avvengono all'interno delle sorgenti astrofisiche tra i protoni accelerati e protoni o fotoni di bassa energia possono emergere neutrini di alte energie, sebbene in numero più piccolo di diversi ordini di grandezza rispetto ai casi precedenti. Questi sono i cosiddetti neutrini *cosmici* o *astrofisici*.

Per rivelare i neutrini provenienti dalle profondità più oscure dello spazio, è stato realizzato il rivelatore di particelle più grande al mondo, esteso per un chilometro cubo di ghiaccio: IceCube. I ricercatori di oltre 40 istituti di ricerca provenienti da 12 Paesi, hanno immesso nel ghiaccio antartico 86 stringhe di acciaio alle quali sono appesi 5160 sensori ottici, un reticolo di "occhi elettronici" pronti a captare il passaggio di un



b.
I neutrini rivelati da IceCube possono provenire da sorgenti astrofisiche (neutrini cosmici o astrofisici) o dall'interazione dei raggi cosmici con l'atmosfera (neutrini atmosferici). IceCube "sopprime" il fondo di neutrini atmosferici provenienti dall'emisfero Sud osservando il muone prodotto in coincidenza con il neutrino.

neutrino. A una profondità tra 1450 e 2450 metri, nel buio e nel silenzio più assoluti, osservano i deboli impulsi luminosi indotti dalle rare collisioni dei neutrini. IceCube identifica un neutrino atmosferico all'incirca ogni sei minuti, ma lo scopo primario è identificare i neutrini astrofisici prodotti dalle mostruose macchine astrofisiche che accelerano i raggi cosmici. I sospetti si concentrano sui fenomeni più violenti nell'universo, quali i *nuclei galattici attivi* (Agn) (vd. fig. a, ndr), galassie dotate di un'enorme potenza radiativa presumibilmente alimentata dai buchi neri al loro centro, e i *gamma ray burst* (Grb), gli spaventosi lampi di radiazione di durata compresa tra meno di un secondo e diversi minuti, così energetici da poter giungere sino a noi dai confini dello spazio osservabile. Indicazioni sulla validità di queste congetture si possono ricavare dall'osservazione dei raggi gamma di alta energia emessi da queste sorgenti. Ma solo l'osservazione dei neutrini dimostrerebbe che queste sorgenti accelerano i protoni e gli ioni osservati sulla Terra fino a energie estreme (vd. Asimmetrie n. 15 p. 11, ndr).

La ricerca dei messaggeri cosmici è stata coronata dal successo nel 2012, dopo sette anni dall'inizio della sua costruzione, quando gli oltre 260 ricercatori internazionali coinvolti nell'esperimento IceCube hanno scoperto due neutrini extraterrestri, che battezzarono Ernie e Bert, citando la famosa trasmissione televisiva Muppet Show. I due neutrini avevano un'energia inusitatamente elevata, superiore a un PeV. Questo aspetto li distingue dal fondo di neutrini atmosferici. Dopo la

rivelazione di neutrini di più bassa energia dalla supernova SN1987A nel 1987, questa rappresenta quindi la seconda osservazione di neutrini provenienti dal di fuori del sistema solare. L'anno successivo, in un'appassionante corsa al successo, una seconda analisi accurata dei dati raccolti in due anni da IceCube ha messo in evidenza 26 altri eventi, a energie di poco inferiori, a partire da circa un TeV. Un terzo anno di raccolta di dati è stato aggiunto poco dopo, mettendo in evidenza in tutto 37 eventi, tra cui il neutrino battezzato Big Bird, dall'amato serial americano, che, battendo ogni record precedente, esibiva ben due PeV di energia!

Non solo l'energia più alta, ma anche la distribuzione angolare distingue gli eventi rivelati dai neutrini provenienti dall'atmosfera terrestre. La produzione dei neutrini atmosferici è sempre accompagnata da muoni. Se queste interazioni con l'atmosfera avvengono nell'emisfero sud, i muoni possono penetrare lo strato di ghiaccio che sovrasta il rivelatore e rilasciare un segnale che consente di identificarli come fondo spurio. Se di origine atmosferica, gli eventi identificati da IceCube dovrebbero provenire prevalentemente dall'emisfero nord, da dove i muoni, assorbiti dalla Terra, non possono raggiungere il rivelatore e quindi è possibile "sopprimere" il fondo atmosferico. Al contrario, gli eventi di IceCube ricoprono per lo più l'emisfero sud. Secondo i ricercatori, essi provengono inequivocabilmente dall'esterno del sistema solare.

Indagini sulla direzione di provenienza degli eventi e sul tempo di arrivo degli stessi non hanno ancora permesso di identificare le loro sorgenti: i neutrini rivelati sono ancora troppo pochi e non si possono trarre conclusioni.

Interpretazioni alternative coinvolgono la nuova fisica, invocando per esempio il decadimento o l'auto-annichilazione di materia oscura (vd. p. 24, ndr) o un aumento della sezione d'urto dei neutrini o l'intervento di *leptoquark*, presunti mediatori delle interazioni tra quark e neutrini, predetti in alcune estensioni del modello standard. Queste sono solo alcuni esempi di interessanti opzioni, vecchie e nuove, che possano spiegare queste osservazioni di IceCube.

I sensori ottici continuano a prendere dati indisturbati nel loro alloggio sotto il Polo Sud geografico e i ricercatori contano di risolvere questo intrigante problema nei prossimi anni.

Il 2013 è stato indubbiamente un anno campale per i



ricercatori di IceCube. Accanto alla scoperta che segna la nascita dell'astronomia dei neutrini di alta energia, recentemente confermata, il team internazionale ha pubblicato una misura dei parametri di oscillazione dei neutrini. Questi caratterizzano la trasformazione dei neutrini da un tipo (o meglio sapore, che può essere elettronico, muonico o del tau) a un altro confermando che i neutrini hanno una massa non nulla seppur piccolissima. I parametri di oscillazione riportati da IceCube sono stati ottenuti dall'osservazione di una riduzione del flusso di neutrini atmosferici muonici a determinate direzioni ed energie, utilizzando la parte più densa di sensori ottici del rivelatore. Questa sottounità, chiamata DeepCore, è capace di registrare neutrini a energie più basse, a partire da qualche GeV. Quello che è rilevante di questo risultato è che dimostra che i telescopi di neutrini possono potenzialmente contribuire in settori di ricerca che spaziano ben oltre l'astrofisica, in una corsa al successo in competizione con esperimenti "mirati" come SuperKamiokande. E che promettono qualche sorpresa. IceCube è anche a caccia di neutrini emergenti dall'annichilazione di materia oscura (vd. p. 26, ndr), accumulata per cattura gravitazionale al centro di grandi corpi celesti come la Terra, il Sole o la nostra galassia. Abbattendo ulteriormente la soglia energetica (l'energia minima rivelabile di un neutrino) al di sotto di 10 GeV, diverrebbe invece possibile misurare

la *gerarchia di massa* dei neutrini, ovvero l'ordine in cui sono disposte le masse dei tre sapori di neutrini. Con questo scopo, una nuova e più vasta squadra di ricercatori sta lavorando al progetto Pingu, che vuole realizzare un nocciolo denso di altre 40 stringhe all'interno di IceCube. Alle alte energie invece, si prepara un'estensione del volume sensibile di IceCube di un ordine di grandezza (IceCube-Gen2) per scoprire le sorgenti del segnale astrofisico appena intravisto.

I telescopi di neutrini sono solo all'inizio di un'emozionante nuova era e nuove rivoluzionarie scoperte sono presumibilmente alle porte.

c.

Il laboratorio di IceCube presso la stazione Amundsen-Scott South Pole Station, nell'Antartico. Il laboratorio ospita i computer che raccolgono i dati. Solo gli eventi interessanti vengono inviati all'Università del Wisconsin-Madison, dove i fisici della collaborazione li analizzano.

Biografia

Elisa Bernardini è professoressa all'Università Humboldt di Berlino e al Deutsches Elektronen-Synchrotron (Desy) in Germania. Fa parte delle collaborazioni IceCube e Magic. Prima di trasferirsi in Germania nel 2002, ha studiato a Bologna e poi a L'Aquila, in collaborazione con i Laboratori Nazionali del Gran Sasso dell'Infn. Dal 2002 al 2005 ha partecipato a tre spedizioni in Antartide per la manutenzione di Amanda, il telescopio di neutrini progenitore di IceCube.

Link sul web

<https://southpoledoc.wordpress.com/tag/icecube-neutrino-observatory/>

<http://www.km3net.org/home.php>

<http://baikalweb.jinr.ru>

Accordi fondamentali

L'affascinante mondo delle stringhe

di Marco Serone



a.
Come le corde di un violino producono suoni diversi secondo il modo in cui vibrano, così le oscillazioni diverse delle stringhe corrispondono a particelle differenti.

La *teoria delle stringhe* (o *corde*) è, al momento, la teoria più promettente per tentare di risolvere uno dei maggiori problemi teorici che affliggono la fisica fondamentale: come integrare la teoria della gravitazione di Einstein (nota anche come relatività generale) nell'ambito della meccanica quantistica.

Storicamente, la teoria nasce nel 1968 per tutt'altri scopi (capire le interazioni forti), con il fisico italiano Gabriele Veneziano. Essa si basa sull'assunto che tutte le particelle elementari che osserviamo non sono nient'altro che piccolissime *stringhe* oscillanti. Come le corde di un violino producono suoni diversi secondo il modo in cui vibrano, così oscillazioni diverse delle stringhe corrispondono a particelle differenti. Le stringhe possono essere *chiuse* o *aperte* e possono fondersi tra di loro (vd. in *Asimmetrie* n. 5 p. 42 fig. a, ndr).

Qualche anno dopo il lavoro di Veneziano, si comprese che le interazioni forti sono spiegate da una teoria diversa da quella delle stringhe, denominata *cromodinamica quantistica* (vd. in *Asimmetrie* n. 16 p. 14, ndr). Inoltre, all'incirca nello stesso periodo, i ricercatori osservarono che tra le diverse oscillazioni della stringa appariva sempre il *gravitone*, ovvero la particella

responsabile delle interazioni gravitazionali. Abbandonata come teoria delle interazioni forti, la teoria delle stringhe fu, dunque, elevata allo *status* più ambizioso di teoria quantistica della gravitazione. Da allora, diversi importanti sviluppi teorici si sono registrati nel corso degli anni.

La teoria delle stringhe, la cui struttura è alquanto complessa, sembra aggregare efficacemente tutta una serie di idee circolanti nella fisica fondamentale per spiegare varie problematiche ancora aperte, soprattutto di natura teorica, che gli scienziati si trovano ad affrontare nell'ambito della relatività generale e nel modello standard delle particelle elementari.

Una delle sue principali peculiarità è la predizione secondo cui nell'universo non esisterebbero solo le tre dimensioni spaziali che percepiamo (altezza, lunghezza e larghezza), bensì nove o dieci dimensioni, a seconda di quale variante della teoria si consideri.

Le sei o sette dimensioni "extra" non sarebbero percepibili in quanto avviluppate su se stesse su scale piccolissime (in gergo, si dice che sono *compattificate*). Per rendere l'idea, si immagina un tubo molto lungo e piuttosto sottile. Osservandolo

da lontano, il tubo apparirà come un oggetto unidimensionale, praticamente come una semplice linea, mentre, osservandolo da vicino con una lente o con un microscopio, si potrà apprezzare la sua struttura bidimensionale.

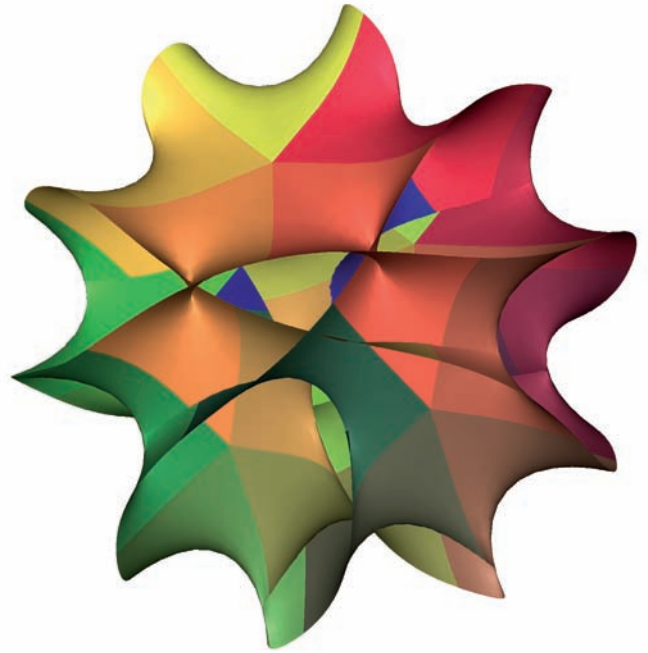
Analogamente, stando alla teoria delle stringhe, le dimensioni extra sarebbero così sottili da non essere percepite. Per poter svelare le altre dimensioni, di cui – peraltro – non conosciamo la lunghezza precisa, dovremmo disporre di uno strumento ben più potente dell'attuale acceleratore Lhc.

Ma perché abbiamo proprio bisogno di queste stringhe? Proviamo a spiegare meglio il problema che dovrebbero risolvere.

La relatività generale asserisce che spazio, tempo, energia e materia sono correlati, vale a dire che la forma dello spaziotempo, ossia la sua curvatura, è determinata dall'energia e dalla materia in esso contenute. La curvatura dello spaziotempo è quella che noi percepiamo come gravità. Il comportamento della materia a piccolissime distanze è invece governato dalla meccanica quantistica. Poiché la gravità è di gran lunga la forza fondamentale più debole che esista in natura, si può legittimamente trascurare la minima curvatura dello spazio indotta dalle particelle elementari, quando si studia l'infinitamente piccolo. Analogamente, è più che lecito trascurare la meccanica quantistica delle particelle elementari, quando si studiano fenomeni macroscopici. Pertanto, da una parte disponiamo della relatività generale, che descrive i fenomeni macroscopici gravitazionali e, dall'altra, della meccanica quantistica, che descrive l'infinitamente piccolo ed è alla base di tutte le altre forze della natura.

Entrambe queste teorie sono state ampiamente confermate dagli esperimenti, ciascuna nel proprio regime di validità (vd. p. 10, ndr), in cui l'altra non gioca nessun ruolo. Tuttavia, esistono necessariamente dei regimi di energia e di distanza in cui non si può descrivere un fenomeno fisico usando soltanto l'una o l'altra teoria. Tali regimi non sono ancora stati direttamente esplorati, ma è inevitabile che, a distanze enormemente più piccole (o a energie enormemente più grandi) di quelle esplorate finora, la gravità e la meccanica quantistica debbano essere considerate congiuntamente. Anche se ancora non abbiamo "sotto mano" un processo fisico che lo richieda, da un punto di vista teorico è assolutamente imprescindibile comprendere il modo di combinare insieme la gravità con la meccanica quantistica. Tale combinazione non appare affatto facile. Ciò che rende la teoria delle stringhe promettente è il fatto che, in un certo senso, essa predice l'esistenza stessa della gravità, dal momento che la vibrazione della stringa che dà luogo al gravitone è sempre presente.

D'altro canto, la nostra teoria presenta un problema di base: al momento, non è chiaro quale tipo di esperimento potrebbe confermarne o meno la validità, e questo, spesso, è motivo di critica. Tuttavia, il fatto che la teoria entri in gioco in regimi estremi della natura, non facilmente accessibili, rende inevitabili le difficoltà che si frappongono a una sua verifica sperimentale. Va anche aggiunto che, indipendentemente dall'effettiva esistenza delle stringhe, moltissime sono le idee teoriche nate nell'ambito di questo filone di ricerca e, successivamente, migrate a vantaggio di altri campi della fisica teorica, cosicché, anche volendo considerare solo tale aspetto, la teoria può essere considerata già estremamente fruttuosa.



b.
Proiezione bi-dimensionale di uno spazio compatto noto come *Calabi-Yau*. Si tratta di un tipo di spazio molto popolare nella teoria delle stringhe. Come si evince dalla figura, le sei dimensioni extra in questi tipi di spazi sono genericamente arrotolate tra di loro in un modo molto complicato.

Per concludere, dato che molti aspetti delle stringhe attendono ancora di essere chiariti, appare prematuro cercare di stabilire se la loro teorizzazione sia solo una complicatissima (seppure utilissima, almeno dal punto di vista teorico) invenzione matematica o se si tratti effettivamente della "teoria del tutto", che unifica in un solo contesto tutta la fisica fondamentale esistente.

In ogni caso, siamo di fronte a una concezione ambiziosa, che non conosce precedenti nella storia della fisica e, in mancanza di teorie alternative altrettanto valide, è del tutto comprensibile il fascino e l'attrattiva che le stringhe hanno esercitato e che continuano a esercitare tra i fisici teorici.

Biografia

Marco Serone è professore associato di fisica teorica presso la Scuola Internazionale Superiore di Studi Avanzati (Sissa) di Trieste. Si occupa principalmente di fisica delle particelle elementari e per vari anni ha svolto attività di ricerca nell'ambito della teoria delle stringhe.

Link sul web

http://www.stringwiki.org/wiki/String_theory_for_non-physicists

<http://scienzapertutti.inf.infn.it/string/percorso/isola.swf>

[as] intersezioni

Loro siamo noi.

di Kip Thorne

fisico teorico e consulente scientifico del film *Interstellar*

Il recente film *Interstellar* di Christopher Nolan è pieno di nuova fisica. E non a caso. Il consulente scientifico, Kip Thorne, del California Institute of Technology, uno dei maggiori esperti di relatività generale, ha posto infatti come condizione che nel film fossero rappresentati scenari coerenti con le attuali teorie della fisica o, quantomeno, ispirati alle ipotesi teoriche che costituiscono oggi argomento di ricerca tra i fisici: “congetture non dimostrate rigorosamente ma verosimili” (in inglese le chiama *educated guess*), insomma, non del tutto prive di fondamento (di quelle che potrebbero davvero divenire un giorno nuove leggi della fisica), o vere e proprie speculazioni, ma tali che uno scienziato della sua portata riesca a immaginarle plausibili. Assieme al film è uscito un libro, scritto dallo stesso Thorne (*The Science of Interstellar*, ed. W.W. Norton & Company), da cui pubblichiamo un brano qui di seguito.

Thorne immagina per il film (come molti fisici ipotizzano per la realtà, vd. ad esempio l'articolo a p. 42) che lo spaziotempo contenga delle dimensioni spaziali in più, sia cioè quello che i fisici teorici chiamano un *bulk* all'interno del quale si trova un sotto-spaziotempo (in gergo, *brana*, termine derivato da membrana) con tre dimensioni spaziali e una temporale, corrispondenti allo spaziotempo in cui abitiamo (vd. fig. a, a sinistra). Per *Interstellar* Thorne immagina che esista una sola dimensione in più: in totale il *bulk* è composto quindi da 5 dimensioni, di cui 4 spaziali e una temporale. Strani esseri, che nel film vengono chiamati “Loro” sono riusciti a capire le anomalie gravitazionali che affliggono la Terra e a dominarle. Ma chi sono “Loro” e quanto è plausibile tutto ciò? (Attenzione, contiene spoiler!)

Nel 1844 Edwin Abbott scrisse un'opera satirica intitolata *Flatlandia: Racconto fantastico a più dimensioni*. Sebbene oggi la sua satira sulla cultura vittoriana sembri pittoresca e il suo atteggiamento nei confronti delle donne scandaloso, il luogo in cui è ambientato il racconto è molto importante per il film *Interstellar*. Ve lo consiglio.

Abbott descrive le avventure di un essere di forma quadrata che vive in un universo bidimensionale chiamato Flatlandia (dall'inglese *flat*, piatto, ndr). Il Quadrato visita un universo unidimensionale chiamato Linelandia (dall'inglese *line*, linea, ndr), un universo a zero dimensioni chiamato Pointlandia (da *point*, punto, ndr) e, avvenimento per lui ancor più sorprendente, un universo tridimensionale chiamato Spacelandia (da *space*, spazio, ndr). Inoltre, mentre si trova a Flatlandia, riceve la visita di un essere sferico proveniente da Spacelandia.

Quando ho incontrato Christopher Nolan per la prima volta, è stata una piacevole sorpresa scoprire che entrambi avevamo letto il racconto di Abbott e che ci era piaciuto molto.

Nello spirito dell'opera di Abbott, immaginate di essere bidimensionali come il Quadrato e di vivere in un universo a due dimensioni come Flatlandia. Il vostro universo potrebbe essere il piano di un tavolo, un foglio di carta, o una membrana di gomma. Nello spirito della fisica moderna, definisco tale universo una brana bidimensionale.

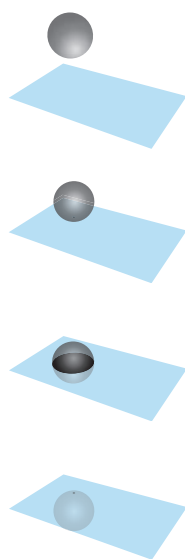
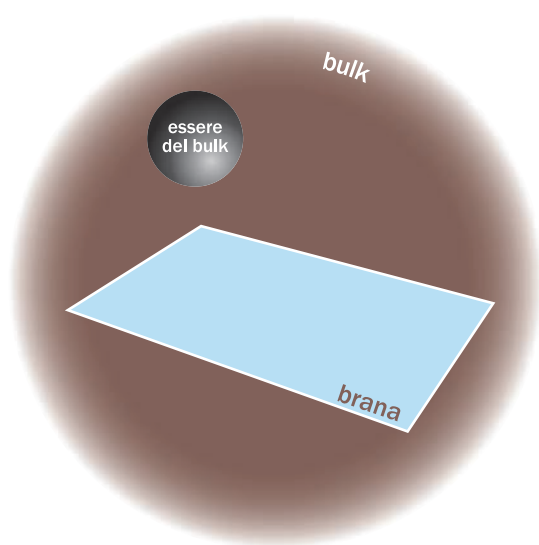
Essendo persone ben istruite, supponete che esista un *bulk* tridimensionale, in cui la vostra brana è incorporata, ma non ne siete certi. Immaginate che emozione, se un giorno vi trovaste

di fronte una sfera proveniente dal *bulk* tridimensionale, cioè quello che potreste definire come un “essere del *bulk*”.

In un primo momento non capireste che si tratta di un essere del *bulk*, ma dopo un'attenta osservazione e una lunga riflessione, non trovereste un'altra spiegazione. Ecco cosa osservereste: d'un tratto, senza preavviso e senza una sorgente di provenienza apparente, un punto appare nella vostra brana. Il punto si espande fino a diventare un cerchio pieno che raggiunge un diametro massimo, quindi si riduce gradualmente a un punto e scompare completamente (vd. fig. a, a destra, ndr). [...]

Se esistono esseri appartenenti al *bulk* (ora Thorne immagina di stare in un *bulk* di 5 dimensioni, in cui si trova lo spaziotempo quadridimensionale, ndr), di cosa sono fatti? Certamente non di materia fatta di atomi come noi. Gli atomi hanno tre dimensioni spaziali e possono esistere solo in spazi tridimensionali, non quadridimensionali. E ciò vale anche per le particelle subatomiche, per i campi elettrici, i campi magnetici e le forze che tengono insieme i nuclei atomici.

Alcuni dei fisici più brillanti al mondo hanno studiato molto per capire il comportamento della materia, dei campi e delle forze, nel caso in cui il nostro universo fosse davvero una brana immersa in uno spazio con un numero superiore di dimensioni. I loro sforzi hanno condotto a una conclusione piuttosto affidabile, secondo cui tutte le particelle, tutte le forze e tutti i campi noti agli esseri umani sono limitati alla nostra brana, con un'unica eccezione: la gravità e la deformazione dello spaziotempo ad essa associata.



a.
Rappresentazione schematica di una brana di 2 dimensioni immersa in un *bulk* di 3 dimensioni. A destra, l'attraversamento della brana di un "essere del *bulk*".

b.
Da sinistra, David Gyasi (che interpreta l'astronauta Romilly), Kip Thorne, Anne Hathaway (Amelia Brand nel film), Jessica Chastain (Murphy Cooper), Michael Caine (il professor Brand) assieme a Stephen Hawking (amico di Kip Thorne, la cui vita è stata recentemente raccontata nel film *La teoria del tutto*), durante l'anteprima di *Interstellar* a Londra.

Potrebbero esistere altri tipi di materia, di campi e di forze aventi quattro dimensioni spaziali e presenti nel *bulk*; ma, se esistono, non ne conosciamo la natura. Possiamo solo speculare, come fanno i fisici. Ma non abbiamo alcuna prova sperimentale o basata su delle osservazioni, che possa guidare le nostre speculazioni. Nel film *Interstellar*, si vede il professor Brand speculare sulla sua lavagna. Formulando un'ipotesi ragionevole e abbastanza plausibile, se esistessero forze, campi e particelle del *bulk*, noi non saremmo mai in grado di percepirli o vederli. Nel caso in cui un essere del *bulk* passasse attraverso la nostra brana, non vedremmo la sostanza di cui è fatto; le sezioni trasversali di un tale essere sarebbero trasparenti.

D'altra parte, sentiremmo e vedremmo la gravità dell'essere del *bulk* e la relativa deformazione dello spazio e del tempo. Ad esempio, la comparsa nel mio stomaco di un'ipersfera del *bulk* con un'attrazione gravitazionale sufficientemente elevata potrebbe provocarmi i crampi, perché i miei muscoli si contrarrebbero nel tentativo di resistere alla forza che li attira verso il centro della sezione sferica di tale essere. [...]

Tutti i personaggi in *Interstellar* sono convinti dell'esistenza di esseri del *bulk*, anche se raramente li chiamano così. Di solito, si riferiscono a tali esseri dicendo "Loro". Un "Loro" riverenziale. All'inizio del film, Amelia Brand dice a Cooper: "E chiunque essi siano, sembra che ci stiano proteggendo. Quel *wormhole* ci permette di raggiungere altre stelle. È apparso proprio quando ci serviva". Una delle idee più intelligenti e affascinanti di Christopher Nolan è immaginare che "Loro"

siano in realtà i nostri discendenti: esseri umani che, in un lontano futuro, si evolvono fino ad acquisire un'ulteriore dimensione spaziale e che vivono nel *bulk*. Verso la fine del film, Cooper dice a Tars: "Ancora non ti è chiaro? Non sono esseri, siamo noi. Quello che io ho fatto per Murph, loro lo fanno per me. Per tutti noi". E Tars risponde: "Le persone non sanno costruire questo" (riferendosi al tesseratto in cui si trova Cooper). "No, non ancora", ribatte Cooper, "ma un giorno sì. Non io e te. Ma altre persone. Una civiltà che si è evoluta al di là delle quattro dimensioni che conosciamo". Cooper, Brand e l'equipaggio della *Endurance* in realtà non sentono né vedono mai la gravità dei nostri discendenti nel *bulk*, né i loro vortici e deformazioni spaziali. Questa parte, se mai, è lasciata a un ipotetico *sequel* di *Interstellar*. Ma lo stesso Cooper più vecchio, attraversando il *bulk* grazie al tesseratto, entra in contatto con l'equipaggio della *Endurance* e con il giovane se stesso, li raggiunge attraverso il *bulk*, in modo gravitazionale. Brand percepisce e vede la sua presenza, e pensa che lui sia "Loro".



[as] radici

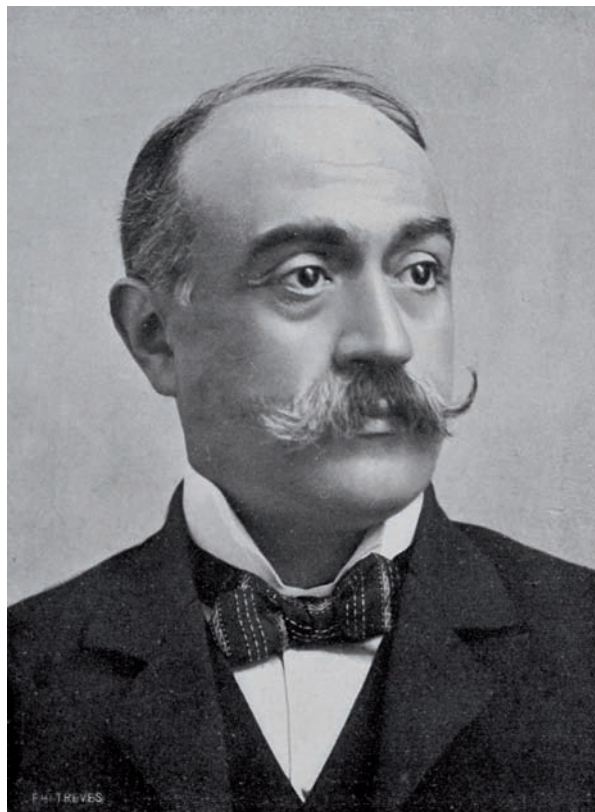
Il nuovo, cent'anni fa.

di Giuseppe Giuliani

storico della fisica

a.
Augusto Righi coniò il termine “La Nuova Fisica” nel 1912, riferendosi alle scoperte di fine Ottocento e inizio Novecento.

L'espressione “nuova fisica”, con cui si suole oggi designare quel complesso di teorie e di fenomeni che vanno al di là del modello standard delle interazioni fondamentali, è già comparsa nella storia della fisica circa un secolo fa. Verso la fine dell'Ottocento, la meccanica, la termodinamica e l'elettromagnetismo costituivano i fondamenti teorici della fisica. Nell'arco di pochi anni, dallo studio della conduzione elettrica nei gas rarefatti, iniziato a metà dell'Ottocento, trassero origine, in modo diretto o indiretto, una serie di rilevanti scoperte: i raggi X (1895), la radioattività naturale (1896), l'elettrone (1897). Fu proprio in riferimento a questi fenomeni che Augusto Righi, il più famoso fisico sperimentale italiano dell'epoca, coniò la locuzione “La Nuova Fisica”, usandola come titolo di una conferenza che tenne nel 1912 alla Società Italiana per il Progresso delle Scienze (Sips), le cui riunioni annuali rappresentavano un'importante occasione di confronto interdisciplinare e di diffusione dei risultati della ricerca scientifica.



A partire dall'inizio del Novecento, le “novità” della fisica si moltiplicarono. Nel 1900, Max Planck, nel tentativo riuscito – ma non ancora rigoroso (come argomentò Einstein nel 1906) – di fornire una spiegazione della radiazione contenuta all'interno di un corpo cavo in equilibrio termico (radiazione di “corpo nero”), introdusse la “costante della natura” h (designata poi con il suo nome), più tardi (1905-1907) interpretata da Einstein come origine della discontinuità nella distribuzione dell'energia in diversi sistemi fisici: fasci di luce e atomi che oscillano nei cristalli intorno alle loro posizioni di equilibrio. Secondo Einstein, la luce, in determinate condizioni, poteva essere descritta come costituita da “quanti di luce” (successivamente chiamati *fotoni*), la cui energia era connessa, attraverso la costante h di Planck, alla frequenza della luce descritta come un'onda elettromagnetica. Nel 1911, Ernest Rutherford mostrò che gli atomi, oltre agli elettroni, contengono un nucleo carico positivamente. Nel 1913, Niels Bohr, sulla base del modello atomico di

Rutherford e ipotizzando (con l'uso della costante h) che l'energia dell'elettrone dell'atomo di idrogeno potesse assumere solo valori discreti, trovò una spiegazione per la radiazione elettromagnetica emessa o assorbita dall'atomo, in sorprendente accordo con i dati sperimentali noti da tempo. Nel frattempo (1912), Max von Laue aveva mostrato che i solidi cristallini agiscono come reticoli di diffrazione per i raggi X, aprendo così la via allo studio sperimentale delle strutture cristalline. Tra l'altro, questa tecnica ha condotto alla scoperta della struttura del Dna (1953).

Parallelamente, Einstein rinnovò la dinamica e la teoria gravitazionale newtoniana, sviluppando, rispettivamente, la teoria della relatività speciale (1905) e della relatività generale (1916).

Si avviò così un processo di profonda revisione della concezione della materia: gli atomi, considerati nell'Ottocento come un'ipotesi euristica, si trasformarono in oggetto di studio sperimentale e teorico diretto. Nei decenni successivi, la meccanica quantistica, l'elettrodinamica quantistica e la cromodinamica quantistica si sono affermate come potenti

strumenti di indagine teorica dei fenomeni atomici e subatomici. La conoscenza del mondo microscopico ha aperto anche nuove vie per la comprensione dei fenomeni cosmici e permesso l'abbozzo di un modello riguardante l'origine dell'universo.

Dopo la seconda guerra mondiale, la ricerca sperimentale è stata caratterizzata da un intreccio crescente con la tecnologia al punto tale che oggi è opportuno parlare di "tecno-scienza": l'indagine scientifica dipende dai prodotti della tecnologia, che si alimenta, a sua volta, delle nuove conoscenze. Ai problemi posti dal necessario controllo sociale della tecnologia si sovrappongono quelli dovuti alla permanenza di credenze irrazionali, retaggio di secoli passati, che rigenerano costantemente atteggiamenti antiscientifici. Anche gli scienziati debbono partecipare a questa battaglia culturale con un'opera di divulgazione delle conoscenze acquisite e di diffusione di quello che, un secolo fa, ai tempi della nascita della "Nuova Fisica", Vito Volterra, fondatore della Sips e di alcune delle più importanti istituzioni scientifiche di questo Paese, chiamava "sentimento scientifico".



b.
Max Planck (a sinistra) conferisce ad Albert Einstein la "medaglia Max Planck" della Società tedesca di Fisica, il 28 giugno 1929 a Berlino.

[as] illuminazioni

A portata di clic.

Curiosare sul bosone di Higgs o sulla ricerca di nuova fisica, invece che sulle foto dell'ultime vacanze degli amici? Niente di più facile, se avete scaricato la nuova app *The Particle Adventure* disponibile da novembre scorso gratuitamente sia per iOS che per Android.

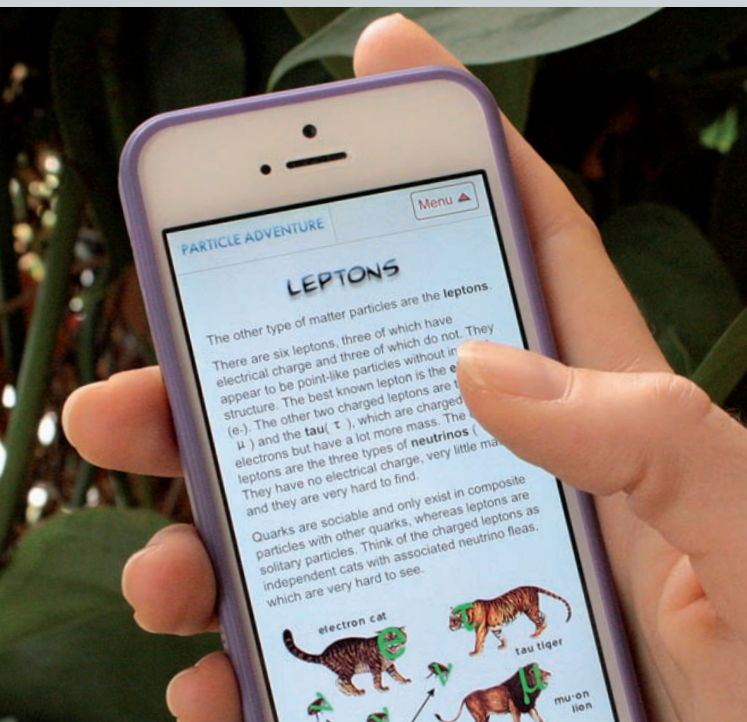
La storia di *The Particle Adventure* parte da lontano. Era il 1989 quando fu scritta la prima versione usando HyperCard, un programma che permetteva di scrivere ipertesti prima dell'avvento del World Wide Web. In un'epoca in cui "neutrino" era una parola nota quasi solo agli specialisti e il bosone di Higgs non aveva ancora riempito le prime pagine dei giornali di tutto il mondo, *The Particle Adventure* fu il primo tentativo di rendere accessibile a un pubblico ampio il modello standard delle particelle e la conoscenza che aveva portato alla sua formulazione. Nel 1995 il programma fu convertito in un sito web, <http://www.particleadventure.org/>, che ricevette quasi cinque milioni di visite durante il primo anno e che ha continuato a essere tra i più consultati da studenti e curiosi di tutto il mondo. Del sito esistono versioni in varie lingue.

La creazione della app (finanziata dal Dipartimento per l'Energia degli Usa e per ora disponibile solo in versione

inglese) è un ulteriore passo verso la diffusione delle idee fondamentali della fisica e sarà molto utile anche agli studenti che dovranno affrontare il programma di fisica moderna all'ultimo anno delle scuole superiori.

Le più importanti scoperte e idee degli ultimi decenni, dall'idea dei quark al bosone di Higgs, dai neutrini all'unificazione delle forze fondamentali, sono organizzate in cinque percorsi principali: "Modello standard", "Acceleratori e rivelatori di particelle", "Scoperta del bosone di Higgs", "Misteri irrisolti" e "Decadimenti e annichilazioni di particelle".

I contenuti della app sono stati curati da fisici esperti dei vari settori, mentre studenti di fisica hanno curato il design, la grafica e soprattutto la parte umoristica. E sembrano aver ottenuto un ottimo risultato, se un insegnante, inizialmente molto scettico sull'insegnamento della fisica moderna alle scuole superiori, ha commentato che *The Particle Adventure* lo ha costretto a ricredersi, visto che la sapiente miscela di *humour*, grafica e scienza ha catturato l'attenzione degli studenti tenendoli allegramente attaccati a cliccare sui loro smartphone. [Barbara Sciascia]



Per scaricare la app *The Particle Adventure*:
<https://play.google.com/store/apps/details?id=gov.lbl.physics> (Android)
<https://itunes.apple.com/us/app/the-particle-adventure/id924683946?ls=1&mt=8> (iOS)

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

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

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

Per contattare
i laboratori dell'Infn:

Laboratori Nazionali di Frascati (Lnf)

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

Laboratori Nazionali del Gran Sasso (Lngs)

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

Laboratori Nazionali di Legnaro (Lnl)

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

Laboratori Nazionali del Sud (Lns)

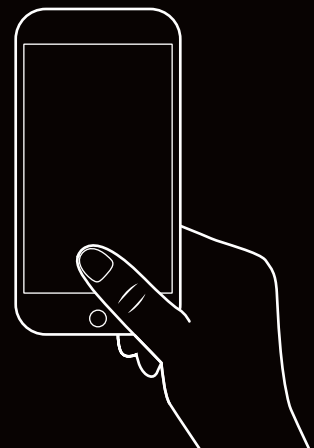
T + 39 095 542296
sislns@lns.infn.it
www.lns.infn.it

www.infn.it



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

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





www.infn.it

rivista online
www.asimmetrie.it