

[il bosone di higgs]

anno 4 numero **8** / 6.09

asimmetrie

rivista trimestrale dell'Istituto
Nazionale di Fisica Nucleare

asimmetrie

Il progresso scientifico, spiega W. Heisenberg in un avvincente articolo, si realizza all'interno di uno scenario filosofico che lo sostiene e lo rende possibile. La storia del progresso scientifico può essere ripercorsa assieme a quella del pensiero filosofico. Le scienze, come le arti figurative, la musica, l'architettura, la psicologia, sono l'espressione di un momento storico che rappresenta un passo in avanti nel percorso comune della civiltà e della conoscenza. Possiamo guardare agli sviluppi della fisica teorica e all'eleganza astratta delle spiegazioni che propone come ad alcune manifestazioni della mente umana, che raccontano dei nostri progressi comuni e regalano un piacere estetico nelle predizioni ardite che gli esperimenti poi verificano. Tenendo per sè l'ultima parola, i dati sperimentali chiudono il circolo virtuoso del progresso nella comprensione della natura. Il quark top, scoperto nella metà degli anni novanta presso l'acceleratore *Tevatron* al Fermilab, vicino a Chicago, è la particella

elementare più massiccia mai osservata, duecento volte più pesante del protone. Era l'ultima particella mancante nel quadro previsto dalla teoria, il Modello Standard della fisica. Pur avendo proprietà simili tra loro, i quark hanno masse talmente diverse che sorge imperiosa la domanda su come le particelle ottengano la massa che le caratterizza. La più calzante delle spiegazioni è che questo avvenga con una interazione più o meno forte con il campo proposto quaranta anni fa dal fisico scozzese Peter Higgs. L'idea è che questo campo conferisca massa alle particelle elementari come i quark e gli elettroni. Queste visioni non intuitive, astratte, lontane dall'esperienza quotidiana, sono parte importante di quello che Heisenberg chiama il *principio semplice unificante* che può spiegare una grande varietà di fenomeni e, in ultima analisi, il piano secondo il quale la natura è costruita. Identificare il bosone di Higgs, la particella associata al campo di Higgs, potrebbe essere la scoperta più importante di questo secolo.

Andrea Vacchi

**asimmetrie**

Rivista dell'Istituto Nazionale
di Fisica Nucleare

Trimestrale, anno 4,
numero 8 giugno 2009

direttore responsabileRoberto Petronzio, *presidente Infn***direttore editoriale**

Andrea Vacchi

comitato scientifico

Danilo Babusci
Piera Sapienza
Crisostomo Sciacca
Amedeo Staiano
Andrea Vacchi

redazione

Vincenzo Napolano
Catia Peduto
Francesca Scianitti
Antonella Varaschin

hanno collaborato

Franco Bedeschi, Alessandro Bencivinni, Piergiorgio Cerello, Maria Curatolo, Vittorio Del Duca, Umberto Dosselli, Pasquale Fabbriatore, Renata Longo, Chiara Mariotti, Mirco Mazzucato, Roberto Petronzio, Lucio Rossi, Pasquale Tucci, gli studenti della Classe IV B del Liceo scientifico statale Bruno Tauschek e le insegnanti Tullia Gaddi e Gilda Bisegni

redazione

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

**progetto grafico
e impaginazione**

Marco Stulle / S lab

coordinamento
redazione grafica

Sara Stulle / S lab

sviluppo webzine

S lab con Massimo Angelini

stampa

Graphart srl, Trieste

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

Registrazione del Tribunale di Roma numero 435/2005 dell'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 giugno 2009. 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

webzine

Asimmetrie 8 e tutti i numeri precedenti della rivista sono disponibili anche on line su www.asimmetrie.it

crediti iconografici

Copertina ©Marco Stulle // foto p. 4, 5
 ©Marco Stulle; fig. a p. 6 ©Cern; fig. b, c p. 7
 ©Asimmetrie/InfIn (realizzato da Internese);
 fig. d-h p. 8 ©University College di Londra/Cern;
 fig. i, l p. 10 ©Cern; fig. 1,2 p. 11 ©Asimmetrie/
 InfIn (realizzato da Internese) // foto p. 13
 ©Cern; foto a p. 14 ©Vittorio del Duca; foto b p.
 14 ©Ken Currie, 2008; foto c p. 15 ©Cern;
 fig. d, p. 16 ©Desy; fig. e, p. 17 ©Cern //
 foto a p. 18 ©Cern; fig. b, p. 20 ©Asimmetrie/
 InfIn (realizzato da Internese); fig. c, d, p. 21
 ©Cern // foto a p. 22 ©Marco Stulle/The Walt
 Disney Company Italia // foto pp. 24, 25 ©Cern;
 foto a p. 26 ©Cern/Asimmetrie/InfIn (realizzato
 da Internese); fig. b-e p. 27 ©Asimmetrie/
 InfIn (realizzato da Internese); foto f p. 28
 ©Cern // foto p. 29 ©Fermilab photo; foto a,
 b pp. 30, 31 ©Fermilab photo // foto p. 32
 ©Andrea Rizzi // foto a p. 35 ©Cern; foto,
 c d p. 36, 37 ©Cern // fig. b, p. 39 ©Boston
 Studies in the Philosophy of Science; fig. c, d
 p. 40 ©InfIn Genova; foto 1, 2 p. 41 ©Philips
 Medical Systems; fig. 3 p. 41 ©Dea Dundera/
 InfIn Trieste // fig. a p. 42 ©Asimmetrie/InfIn
 (realizzato da Internese); foto b p. 43 ©Cern;
 foto c p. 43 ©Ansaldo Superconduttori Genova
 - ASG Gruppo Malacalza; foto d p. 44 ©Ansaldo
 Superconduttori Genova; foto e p. 45 ©Cern;
 fig. 1, 2 p. 46 ©InfIn Lsa Milano; fig. 3 p. 46
 ©Asimmetrie/InfIn (realizzato da Internese)
 // figg. b-g p. 48 ©Marco Stulle; foto h p. 48
 ©Eötvös Loránd Geophysical Institute; fig. i
 p. 49 ©Hebrew University of Jerusalem // fig. pp.
 50, 51 ©Marco Stulle; fig. a, p. 52 ©InfIn/S lab;
 fig. b, p. 52 ©Cern; fig. p. 53 ©InfIn/Centimetrix;
 fig. 1, p. 54 ©Asimmetrie/InfIn (realizzato da
 Internese) // foto a, b p. 55 ©InfIn Lnf // foto
 Pamela p. 56 ©Pamela Collaboration; foto WWW
 p. 56 ©Marco Stulle; foto SuperBeam
 p. 56 ©InfIn Lnf // foto p. 57 ©Marco Stulle.

Per l'immagine di p. 4, 5 si ringrazia Roberto Pastrovicchio.

as

8 / 6.09
[il bosone di higgs]

La particella che dà la massa di Roberto Petronzio	4	[as] tecnologia e ricerca Contro ogni resistenza. di Pasquale Fabbicatore <i>approfondimento di Renata Longo</i>	38
Un tè con Peter Higgs di Vittorio Del Duca	12	Magneti dal superfreddo di Lucio Rossi	42
L'assedio all'Higgs di Chiara Mariotti	18	[as] radici Da Newton a Higgs, breve storia della massa. di Pasquale Tucci	47
[as] con altri occhi Topolino al Cern. di Alessandro Bencivenni	22	Molte reti per una Grid di Mirco Mazzucato e Vincenzo Napolano <i>approfondimenti di</i> <i>Piergiorgio Cerello e Mirco Mazzucato</i>	50
I giganti a caccia di Maria Curatolo	24	[as] incontri Grandi fisici incontrano i giovani. La Classe IV B del Liceo scientifico statale Bruno Touschek e le insegnanti Tullia Gaddi e Gilda Bisegni	55
La ricerca dell'Higgs oltre oceano di Franco Bedeschi	29	[as] news	56
[as] benvenuti a bordo Intervista a Gianluca Cerminara, <i>post-doc</i> al Cern. di Catia Peduto	32		
Lhc: tutto all'estremo di Umberto Dosselli	34		



La particella che dà la massa

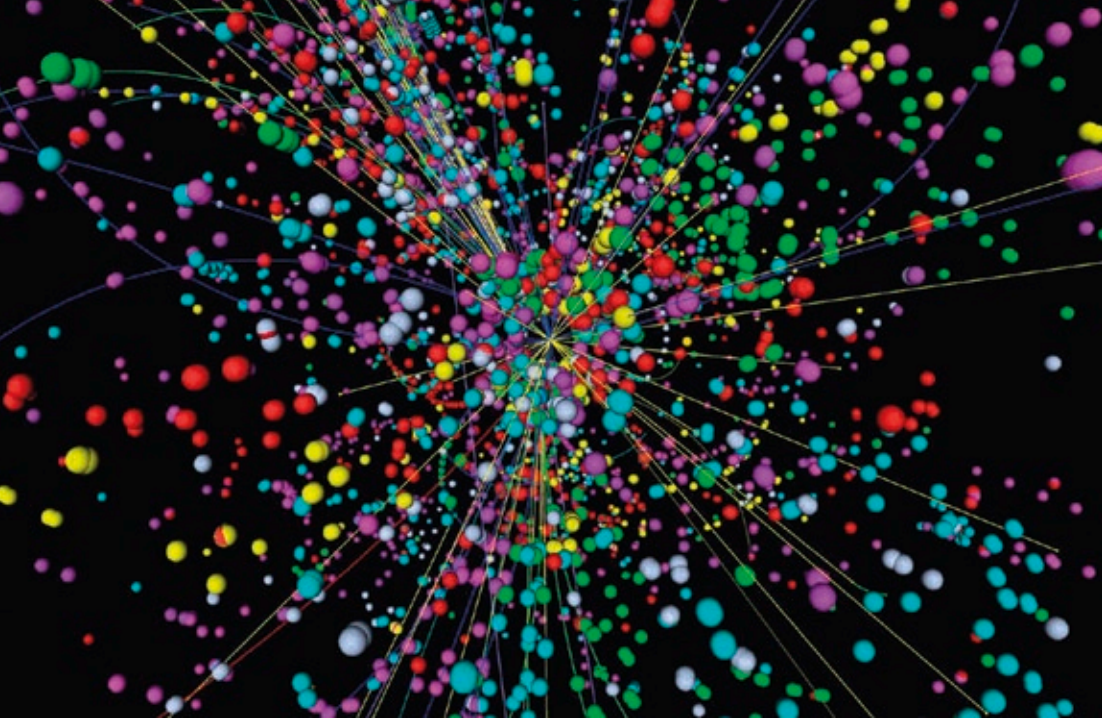
di Roberto Petronzio

Spesso il nome di Lhc (*Large Hadron Collider*), il nuovo acceleratore di particelle che muove i suoi primi passi, ancora un po' incerti, è stato associato al *bosone di Higgs*, alla ricerca di una particella che riveste un ruolo così importante nel *Modello Standard* delle particelle elementari – la teoria che descrive oggi nel modo più completo le particelle elementari e le loro interazioni – da meritare il soprannome di “particella di Dio”. Il soprannome è esagerato, anche perché non siamo certi che si tratti di una particella elementare, seppur giochi come tale il ruolo di pietra angolare del Modello Standard.

Il bosone di Higgs è figlio del meccanismo omonimo e del più generale fenomeno chiamato *rottura spontanea della simmetria*. La simmetria in questione è quella che regola le interazioni elettromagnetiche e deboli, queste ultime responsabili della radioattività dei nuclei instabili e, tra l'altro, della longevità della nostra stella domestica, il Sole.

L'esistenza di simmetrie in natura semplifica enormemente la soluzione delle equazioni che ne descrivono le leggi: ad esempio, se ci troviamo in presenza di forze che sono simmetriche per rotazioni, ossia sono prive di un asse privilegiato, sarà sufficiente risolvere il problema per una direzione arbitraria nello spazio e generalizzare il risultato alle altre direzioni. In natura esistono molti casi di simmetrie rotte spontaneamente: se si risale un pendio con gli sci ai piedi, agganciati a uno skilift, gli sci si muovono su una superficie di neve ondulata, tanto più scavata quanto più remota è l'ultima nevicata. Al contrario, se si è tanto fortunati da essere i primi sciatori dopo un'abbondante nevicata, si può scivolare su una superficie uniforme. Questa ultima garantisce una simmetria che rende equivalenti i punti sul pendio, la simmetria per traslazioni sul pendio, che appare invece violata dalle onde generate dalle folle di sciatori, che distinguono con valli e creste i punti del pendio: è un esempio di come una proprietà di simmetria possa essere rotta in modo casuale. Se si ripetesse però più volte l'esperimento di partire dallo stesso pendio uniforme con diverse schiere di sciatori, si formerebbero ovviamente avvallamenti, ma non negli stessi punti: la simmetria si manifesta nel fatto che la rottura si può realizzare in moltissimi modi equivalenti e indistinguibili, collegati tra di loro appunto dall'originale *invarianza* per traslazioni. La rottura spontanea di una simmetria non è una vera rottura ma solo una diversa realizzazione della simmetria stessa: la simmetria si manifesta nella equivalenza delle opzioni di rottura.

Il *meccanismo di Higgs* descrive ciò che accade quando viene spontaneamente rotta una simmetria che governa interazioni mediate da campi detti di *gauge*, come quelle elettromagnetiche e deboli. La parola gauge, calibro, indica che in qualche modo tali simmetrie consentono di calibrare da un punto all'altro dello *spaziotempo* la funzione che descrive le particelle elementari, in modo arbitrario. Tutte le interazioni fondamentali di cui si ha evidenza in natura sono legate a *simmetrie di gauge*. Tali simmetrie adottano dei mediatori per trasmettere le interazioni: *fotoni* del campo elettromagnetico che fanno interagire gli elettroni, *gluoni* del campo delle interazioni forti che fanno interagire i quark



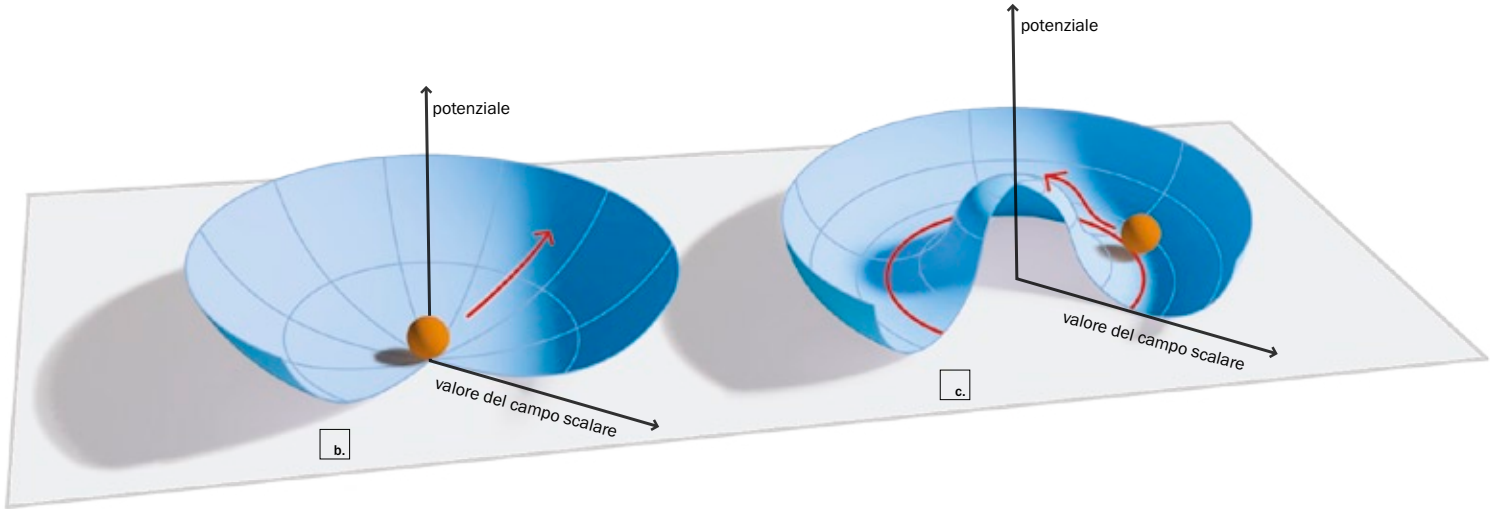
a.

all'interno dei nuclei atomici, *deboloni* (coniato ora per indicare i campi delle interazioni deboli...) che fanno interagire i neutrini e, infine, *gravitoni* che fanno interagire tutto ciò che possiede energia sotto qualche forma. Nella teoria di gauge tali mediatori sono a massa nulla e questo garantisce interazioni *a lungo raggio*, quali quelle elettromagnetiche o gravitazionali delle quali è pervaso tutto l'Universo. L'evidenza sperimentale, tuttavia, ha introdotto un'eccezione a questa regola, in quanto le interazioni deboli sono mediate da particelle pesanti che sono caratterizzate da una massa con valore diverso da zero (vd. fig. a).

Per poter riconciliare una teoria di gauge con mediatori massicci come quelli delle interazioni deboli è necessario ipotizzare un fenomeno di rottura spontanea della simmetria e associarlo a una teoria che descriva una nuova interazione con particelle elementari, finora mai osservate.

Le particelle elementari coinvolte nelle interazioni fondamentali sono descritte in fisica quantistica da equazioni che regolano la distribuzione di insiemi di numeri (detti *campi*) nello spaziotempo, lo spazio relativistico a quattro dimensioni, che descrive fenomeni che si verificano in una certa posizione spaziale e in un certo istante. Dalle fluttuazioni di tali campi sono generati i moti delle particelle associate a un tipo di campo specifico. Un esempio quotidiano è dato dai fotoni, i quanti di luce associati al campo elettromagnetico, ossia l'insieme di quattro numeri definiti in ogni punto dello spaziotempo. Alla resistenza che il campo trova a fluttuare intorno al suo stato di minima energia è collegata la massa della particella associata al campo.

La più semplice teoria di campo, che mostra rottura spontanea di simmetria è quella che vede protagonista un campo definito da un insieme di coppie di numeri associate a ogni punto dello spaziotempo. Se rappresentiamo questo campo, che chiameremo *scalare complesso*, in uno spazio bidimensionale i cui assi rappresentano la coppia di numeri reali che lo definiscono, una rotazione in tale piano non modifica le equazioni del campo. Ci si aspetta che anche il campo che realizza lo stato di minima energia, detto il *vuoto*, sia invariante per la rotazione. Questo, però, dipende dall'andamento dell'energia per un campo costante, detta anche il *potenziale*, con le sue valli e le sue colline. Normalmente il potenziale, l'energia del campo, ha un minimo per valori nulli del campo. In altre parole, lo stato di minima energia (il vuoto) è quello “senza particelle”, ossia a campo nullo. È questo il caso di potenziale con aspetto a scodella, con il minimo di energia del campo nel punto più basso e curvatura identica nelle varie direzioni. In questo caso, un semplice esempio di rottura della simmetria è ottenuto passando dalla forma a scodella a una forma del potenziale a fondo di bottiglia o a sombrero. Se la forma a scodella gode di una perfetta simmetria per rotazioni attorno al suo asse, lo stesso si può dire della forma a sombrero, quindi la simmetria è conservata nel passaggio dall'una all'altra configurazione. La seconda però presenta la rottura spontanea: una pallina posta sul fondo



b.

c.

scivolerebbe da una parte, invece di posizionarsi nell'avvallamento centrale come farebbe nel caso della scodella. Se fatta oscillare, poi, in un caso oscillerebbe intorno al punto di equilibrio nello stesso modo, indipendentemente dalla direzione della spinta iniziale perché la curvatura della scodella è uguale in tutte le direzioni; nel secondo caso, invece, oscillerebbe attorno all'equilibrio se spinta in direzione della salita, ma non oscillerebbe affatto se spinta in direzione dell'avvallamento, perché esistono un'infinità di minimi equivalenti lungo il fondo circolare, tutti collegati dalla simmetria per rotazioni.

Nel caso della forma a sombrero, quindi, il minimo del campo si realizza sul fondo del recipiente dove il valore del campo è diverso da zero. Il vuoto, in questo caso, è riempito dal *rumore di fondo* del campo al suo minimo e la rottura di simmetria porta alla comparsa di due particelle di massa diversa, una per ognuna delle due possibilità di oscillazione attorno al minimo del potenziale. Per le oscillazioni in direzione della salita, a frequenza diversa da zero, la particella del campo ha massa diversa da zero; per le oscillazioni a frequenza nulla, al contrario, lungo la valle dei minimi, la particella associata al campo è una particella a massa nulla, il *bosone di Goldstone*, dal nome del fisico inglese che per primo ha evidenziato questo fenomeno: è proprio l'apparizione di questa particella senza massa la firma della rottura spontanea della simmetria.

Una rottura di simmetria collegata a un campo scalare assicura che sia preservata l'invarianza che regge le leggi della relatività ristretta. Questa richiede, tra l'altro, che continui a valere l'invarianza per rotazioni: se il valore non nullo nel vuoto fosse ad esempio di un campo elettrico, la sua direzione definirebbe un asse privilegiato nell'Universo, dovuta al vuoto, che violerebbe l'invarianza per rotazioni.

Il fenomeno di Higgs è l'evoluzione del fenomeno di rottura spontanea della simmetria in presenza di un campo di gauge, come il campo elettromagnetico. E il bosone di Higgs nasce proprio dall'applicazione della rottura spontanea di simmetria all'invarianza di gauge che governa le interazioni dei campi.

Come detto annunciando il mistero delle interazioni deboli, i mediatori di gauge, come i fotoni del campo elettromagnetico, sono di norma a massa nulla a garanzia della simmetria di cui godono. Nel caso di rottura spontanea della simmetria però, la propagazione del campo di gauge nel vuoto “riempito” dal campo scalare di fondo genera una massa dovuta all'interazione con questo. In un esempio assai divulgativo, chiunque di noi ha sperimentato almeno una volta la forte sensazione di appesantimento che si prova nel correre sulla sabbia piuttosto che su un terreno duro ed elastico. Allo stesso modo, la massa del campo di gauge è dovuta a una proprietà del vuoto anomalo del campo scalare: il valore di vuoto non nullo del campo scalare rende massiccio il campo

a.
Simulazione del decadimento del bosone pesante Z, mediatore delle interazioni deboli, nell'esperimento Cms (*Compact Muon Solenoid*) dell'acceleratore Lhc al Cern. Il bosone Z, che sarà prodotto nella collisione tra fasci di protoni in Lhc, è instabile e decade producendo particelle più leggere. Nella ricerca del bosone di Higgs è fondamentale ricostruire accuratamente tutta l'energia depositata da questi decadimenti nel rivelatore e risalire dalla massa delle particelle prodotte alle caratteristiche delle particelle instabili che le hanno generate.

b.
Il potenziale a scodella gode di una perfetta simmetria per rotazioni attorno al suo asse. Inoltre, una pallina oscilla intorno al punto di equilibrio nello stesso modo indipendentemente dalla direzione della spinta iniziale. Le oscillazioni attorno al minimo di potenziale corrispondono sempre a una particella con una certa massa perché hanno frequenza non nulla.

c.
Anche la forma a sombrero gode di una perfetta simmetria per rotazioni, ma presenta una rottura spontanea che porta alla comparsa di due particelle di massa diversa: quella dotata di massa corrisponde alle oscillazioni in direzione della salita, a frequenza non nulla; la particella priva di massa (il bosone di Goldstone) corrisponde invece alle oscillazioni a frequenza nulla lungo il fondo circolare, luogo di infiniti minimi equivalenti collegati da simmetria per rotazioni.



d.	g.
e.	h.
f.	

Il comportamento di un gruppo di fisici durante un evento sociale affollato: l'analogia del meccanismo di Higgs, proposta da David J. Miller dell'University College di Londra. I fisici rappresentano il mezzo che permea lo spazio. È l'eccitazione stessa del mezzo – quindi del gruppo di fisici – a formare un corpo con una massa consistente, un meccanismo analogo alla formazione del bosone di Higgs.

d.
Il vuoto di Higgs.

e.
Einstein fa ingresso nella sala dove si sta tenendo un incontro tra fisici. Attraendo ammiratori, il suo passaggio crea nella stanza una perturbazione che aumenta progressivamente di intensità.

f.
Questo aumenta la sua inerzia al moto: Einstein sembra acquistare massa, come una particella che si muove nel campo di Higgs.

g.
Allo stesso modo, una notizia che attraversa la stanza...

h.
... crea a sua volta lo stesso tipo di addensamento tra gli scienziati. Ecco la condensazione del bosone di Higgs.

elettromagnetico senza romperne le proprietà di simmetria. Questo fenomeno, detto di Higgs, riconcilia invarianza di gauge e mediatori di gauge dotati di massa, al prezzo di una nuova interazione nascosta con il campo scalare. La particella scalare a massa nulla dovuta alla rottura spontanea di simmetria, il bosone di Goldstone, viene tramutata in una nuova componente fisica del campo elettromagnetico, sotto la forma di polarizzazione longitudinale, ossia lungo la direzione del moto, del campo elettromagnetico. La particella a massa non nulla, corrispondente a fluttuazioni del campo fuori dalla valle dei minimi, resta quale testimone dell'esistenza di particelle scalari all'origine del meccanismo di Higgs: è il bosone di Higgs, la sola particella scalare in grado di confermare l'esistenza di un nuovo tipo di interazioni fondamentali, quelle delle particelle scalari.

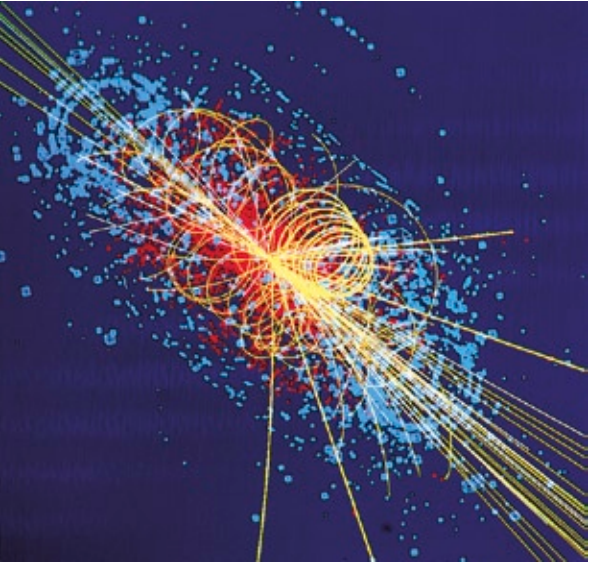
La natura spesso utilizza gli stessi principi in contesti diversi. Una delle proprietà più sorprendenti della materia condensata è la *superconduttività*, grazie alla quale correnti elettriche circolano in un superconduttore senza incontrare alcuna resistenza. Un materiale superconduttore, inoltre, “espelle” il campo magnetico che può penetrarne solo alcuni strati sottili in prossimità della superficie. Questo contraddice il comportamento usuale del campo elettromagnetico che si propaga nello spazio senza attenuarsi e che ha un'influenza a lungo raggio, come conseguenza della massa nulla dei suoi mediatori, i fotoni. È come se nel mezzo speciale costituito dal superconduttore il campo acquistasse una massa e questo valore non nullo definisse una distanza tipica entro quale il campo può far sentire i suoi effetti. È il meccanismo di Higgs all'opera e la massa al campo elettromagnetico è fornita, come nell'esempio descritto precedentemente, dall'interazione con un campo scalare di vuoto. In realtà nel superconduttore non ci sono campi scalari, ma solo gli elettroni e i nuclei degli atomi. Seguendo l'interpretazione della *teoria BCS*, dal nome dei suoi ideatori, Bardeen, Cooper e Schiffer che grazie a essa hanno ottenuto il premio Nobel, il campo scalare si ottiene accoppiando due a due gli elettroni per formare stati legati di *spin intero*, ossia

bosoni (gli elettroni singoli, invece, sono *fermioni* caratterizzati da spin pari a $\frac{1}{2}$), le cui interazioni possono essere descritte tramite campi scalari. Si tratta quindi di un campo scalare “efficace”, ossia di una descrizione del fenomeno tramite un modello: un campo scalare con la rottura della simmetria che ne catturi il meccanismo di base. Se ne deducono due lezioni: la prima è che il fenomeno di Higgs è davvero utilizzato dalla natura almeno nel caso più semplice dell'interazione con un campo elettromagnetico; la seconda è che il campo di Higgs non è in questo caso un campo fondamentale, una nuova particella elementare, ma semplicemente un modo per descrivere il comportamento delle coppie di elettroni che lo compongono. Come vedremo descrivendo il Modello Standard e le sue questioni aperte, quella della elementarietà del campo di Higgs è una delle principali. Oltre a conciliare l'invarianza di gauge con l'esistenza di mediatori di gauge dotati di massa non nulla, il meccanismo di Higgs assolve a un'altra funzione essenziale per ottenere una descrizione dello spettro delle particelle conosciute, quella di fornire il meccanismo attraverso il quale le particelle acquisiscono una massa. Di nuovo, è la propagazione delle particelle nel vuoto non banale generato dal potenziale di Higgs che fornisce a esse una massa proporzionale alle forze con cui le particelle scalari interagiscono con ciascuna delle particelle note. La massa delle particelle elementari che costituiscono la materia fondamentale ha quindi origine da nuove interazioni fondamentali, dette *di Yukawa*. Le particelle scalari, quindi, generano una massa per il bosone di Higgs attraverso la forza di auto-interazione, una massa per i campi di gauge attraverso le forze delle interazioni di gauge con le particelle scalari e, infine, una massa per tutte le particelle di materia attraverso delle forze “su misura” per ogni particella, le interazioni di Yukawa, che danno a ciascuna il suo *sapore*, la sua massa. In natura abbiamo trovato tre famiglie di particelle, ciascuna contenente un modulo standard di particelle, tutte di sapore affine, ossia di masse simili. Le interazioni di Yukawa possono anche coinvolgere particelle appartenenti a famiglie diverse, rendendo possibile il mescolamento tra particelle

di famiglie distinte, tramite interazioni deboli: un fenomeno legato a parametri detti *angoli di mescolamento*. A questi angoli è affidata, tra l'altro, la spiegazione della lievissima asimmetria tra materia e antimateria nell'evoluzione dell'Universo, che ha consentito a quel residuo di materia in eccesso di sopravvivere all'annichilazione con la corrispondente antimateria, permettendo al nostro mondo di esistere.

Il bosone di Higgs non è stato trovato alle energie finora esplorate. La sua massa dipende dalle forze, che chiamerò *scalari*, con cui auto-interagiscono le particelle scalari, che rappresentano una vera e propria nuova interazione oltre alle quattro fondamentali ampiamente soggette a studi e verifiche sperimentali. Trattandosi di una particella di massa troppo elevata per essere stata prodotta negli esperimenti conclusi o in fase di conclusione fino a oggi, essa ha potuto tuttavia influenzare le proprietà di interazione delle particelle attraverso le *correzioni radiative*, o fluttuazioni quantistiche, della sua massa. Lo studio di queste correzioni è stato sviluppato con estrema precisione nell'ultima decade del secolo scorso presso l'acceleratore a elettroni e positroni *Lep* di Ginevra e ha portato a dare indicazioni sulla presenza del bosone di Higgs, restringendo il campo dei valori possibili per la sua massa in una zona di prossima esplorazione. Come già detto, senza l'osservazione del bosone di Higgs la nostra comprensione del mondo delle particelle elementari rimane monca di uno dei suoi tasselli cruciali, l'unico a dipendere dalle forze scalari.

Il nuovo millennio si affaccia con l'entrata in funzione di Lhc, il più importante acceleratore mai costruito prima, che grazie alle energie raggiunte dovrebbe produrre il bosone di Higgs permettendo così di chiarirne le proprietà e, soprattutto, l'elementarietà. Il nuovo acceleratore si presenta come il più promettente tra quelli costruiti finora. Segna anche l'ingresso in un'epoca di strategie globali che la fisica sta intraprendendo per far fronte a investimenti economici e di persone sempre più ingenti. Al nuovo acceleratore operante al Cern di Ginevra lavoreranno non solo le comunità degli stati membri europei, ma le comunità degli Stati Uniti,



i.

della Federazione Russa, del Giappone, dell'India, di Israele, della Cina, della Corea, in una impresa di conoscenza mai tentata prima e unificata dal linguaggio scientifico. Se gli impegni economici sono rilevanti, lo sono anche le ricadute tecnologiche nel settore dello sviluppo degli acceleratori e dell'informatica. Di notevole rilievo sono inoltre lo sviluppo del *middleware*, il codice di programmazione che realizza sempre nuovi protocolli di comunicazione e di condivisione di database e di risorse di calcolo, e delle tecnologie legate alla superconduttività o all'elettronica veloce. Se l'osservazione del bosone di Higgs rappresenta il coronamento dell'attuale quadro interpretativo delle particelle elementari, la sua presenza suscita interrogativi che trovano risposte solo in un'estensione del Modello Standard che comprenda nuovi fenomeni. Il prossimo decennio potrebbe mutare la nostra comprensione delle particelle elementari o semplicemente confermare con la sola scoperta del bosone di Higgs l'attuale architettura del Modello Standard. Alcune indicazioni, spesso basate su criteri di consistenza a energie quasi impensabili, propendono per la prima ipotesi. Da queste potrebbero discendere la supersimmetria o la dissoluzione del bosone di Higgs in una sottostruttura fatta di costituenti più elementari, legati da nuove interazioni. Persino nuove dimensioni dello spazio tempo potrebbero diventare visibili alla risoluzione del gigantesco microscopio rappresentato da Lhc, aprendo la via a una rivoluzione che potrebbe relegare il concetto di particella al passato, abbandonando l'identificazione di elementare con puntiforme in favore di stringhe dalle cui vibrazioni sarebbero generate tutte le teorie di campo, compresa quella scalare da cui nasce il bosone di Higgs.

Biografia
Roberto Petronzio è professore di Fisica Teorica presso l'Università di Roma Tor Vergata e Presidente dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare dal 2004. Alcuni dei suoi contributi originali nello studio delle

forze di legame dei quark, delle interazioni deboli e della meccanica statistica sono alla base delle analisi dei dati sperimentali, applicabili agli acceleratori di particelle attuali e di prossima generazione.

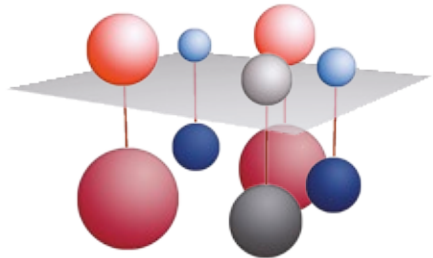
Link sul web

<http://public.web.cern.ch/public/en/Science/Higgs-en.html>
<http://ulisse.sissa.it/chiediAulisse/domanda/2002/Ucau020510d001>
<http://www.symmetrymagazine.org/cms/?pid=1000569>

i. Simulazione al computer del decadimento del bosone di Higgs in quattro muoni, dei quali sono ben visibili le tracce, in giallo. La rivelazione del decadimento è simulata in questa immagine all'interno del rivelatore Cms, uno dei quattro grandi esperimenti pronti a registrare gli urti tra protoni che avverranno in Lhc.

[as] box

Naturalizza e supersimmetria

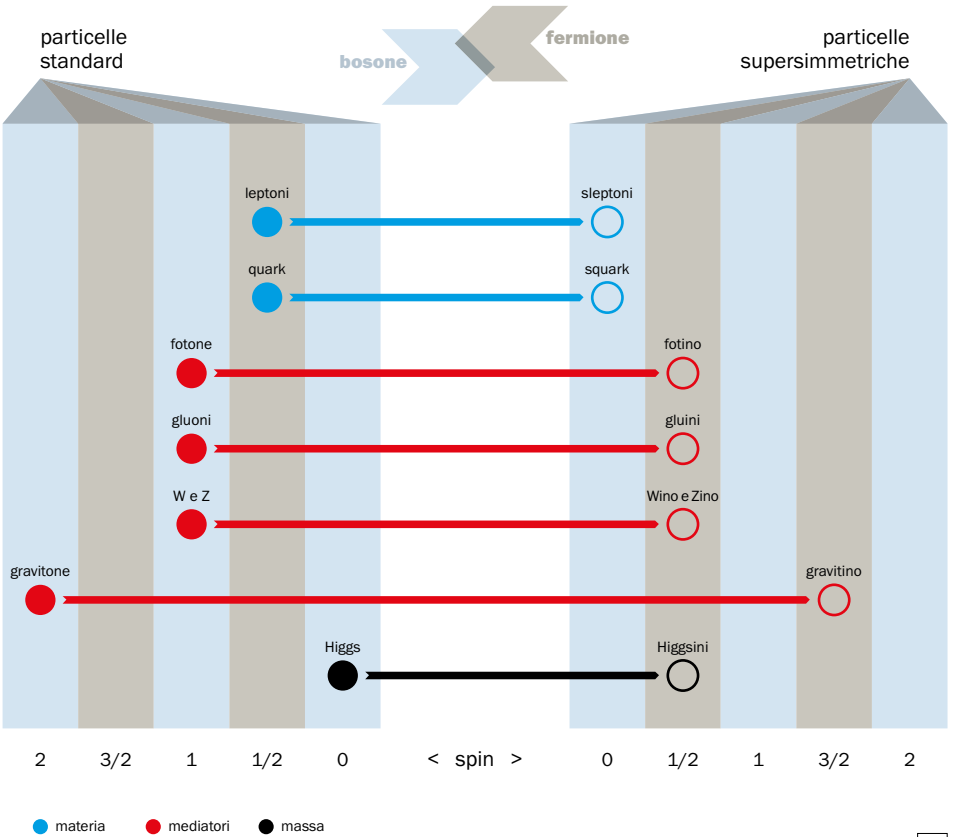


1.

1. Le teorie supersimmetriche prevedono che ogni particella nota abbia una corrispondente particella "speculare": ad esempio, per ogni quark ci dovrebbe essere un corrispondente "squark", all'elettrone si affiancherebbe il "selettrone" e così via. Una delle particelle costituite da "mattoni supersimmetrici", il neutralino di minor massa, potrebbe essere quella che compone la materia oscura, la cui natura è tuttora ignota (vd. *Asimmetrie* n. 4).
2. Uno "specchio" supersimmetrico: per ogni particella ordinaria esisterebbe una particella con spin che differisce di $\pm 1/2$. Ai *fermioni* ordinari, con spin semi-intero (pari cioè ad $1/2, 3/2, \dots$) corrispondono quindi bosoni supersimmetrici con spin intero (pari cioè ad $0, 1, 2, \dots$), mentre ai bosoni ordinari corrispondono fermioni supersimmetrici. Nello schema sono rappresentati, a sinistra, i costituenti della materia ordinaria (quark e *leptoni*), i mediatori delle interazioni forti (gluoni), elettromagnetiche (fotoni), deboli (W e Z) e gravitazionali (gravitoni) e la particella di Higgs, responsabile della massa di tutte le particelle. A destra, sono raffigurati i corrispondenti partner supersimmetrici: queste particelle non sono ancora state osservate sperimentalmente e si ritiene abbiano massa più elevata rispetto alle particelle standard.

Dal punto di vista teorico, un ulteriore elemento che rende in qualche modo diverso il bosone di Higgs è l'influenza delle correzioni dovute alle fluttuazioni quantistiche sulla sua massa: a differenza di quanto accade per le particelle ordinarie di materia, infatti, come gli elettroni o i quark, tali correzioni rischiano di essere per la particella di Higgs assai più grandi dei valori che esse stesse dovrebbero correggere. Il problema delle correzioni fuori controllo viene detto della *naturalizza* o della *gerarchia* e rappresenta uno scenario assai innaturale. Per addomesticare le correzioni è necessario individuare dei meccanismi di cancellazione potenti che proteggano il bosone di Higgs dalle sue fluttuazioni quantistiche. L'unico meccanismo efficace si basa su una simmetria non ancora riscontrata in natura: la *supersimmetria*. Questa prevede l'esistenza di un compagno per ogni particella nota, assicurando così la cancellazione delle correzioni quantistiche più pericolose: la presenza di questi "angeli custodi" supersimmetrici realizzerebbe le cancellazioni in modo naturale, grazie a un principio di simmetria. La supersimmetria è rotta in natura, poiché i partner

supersimmetrici non hanno la stessa massa dei loro compagni. La rottura di simmetria legata al campo di Higgs dovrebbe nascere proprio come conseguenza della rottura della supersimmetria, quindi alla stessa scala di energia: la scala di energia del bosone di Higgs sarebbe così legata a quella della massa dei partner supersimmetrici e le correzioni quantistiche a energie superiori sarebbero perfettamente schermate. Se ci fosse la supersimmetria, una pletora di nuove particelle dovrebbe popolare la sperimentazione al nuovo acceleratore Lhc, tutti i partner supersimmetrici delle particelle che già conosciamo. Tra essi, il più leggero sarebbe stabile se protetto da una particolare simmetria, la *R parità*, che sancisce che una particella partner debba necessariamente transire in un altro partner quando decade. Questo ne farebbe un candidato ideale per impersonare quella *materia oscura* che le osservazioni cosmologiche hanno evidenziato non essere composta delle particelle che conosciamo. La richiesta di naturalizza del bosone di Higgs può dunque implicare nuove interazioni, una nuova simmetria e una possibile spiegazione per la materia oscura.



2.

Un tè con Peter Higgs

Conversazioni con il padre del bosone di Higgs.

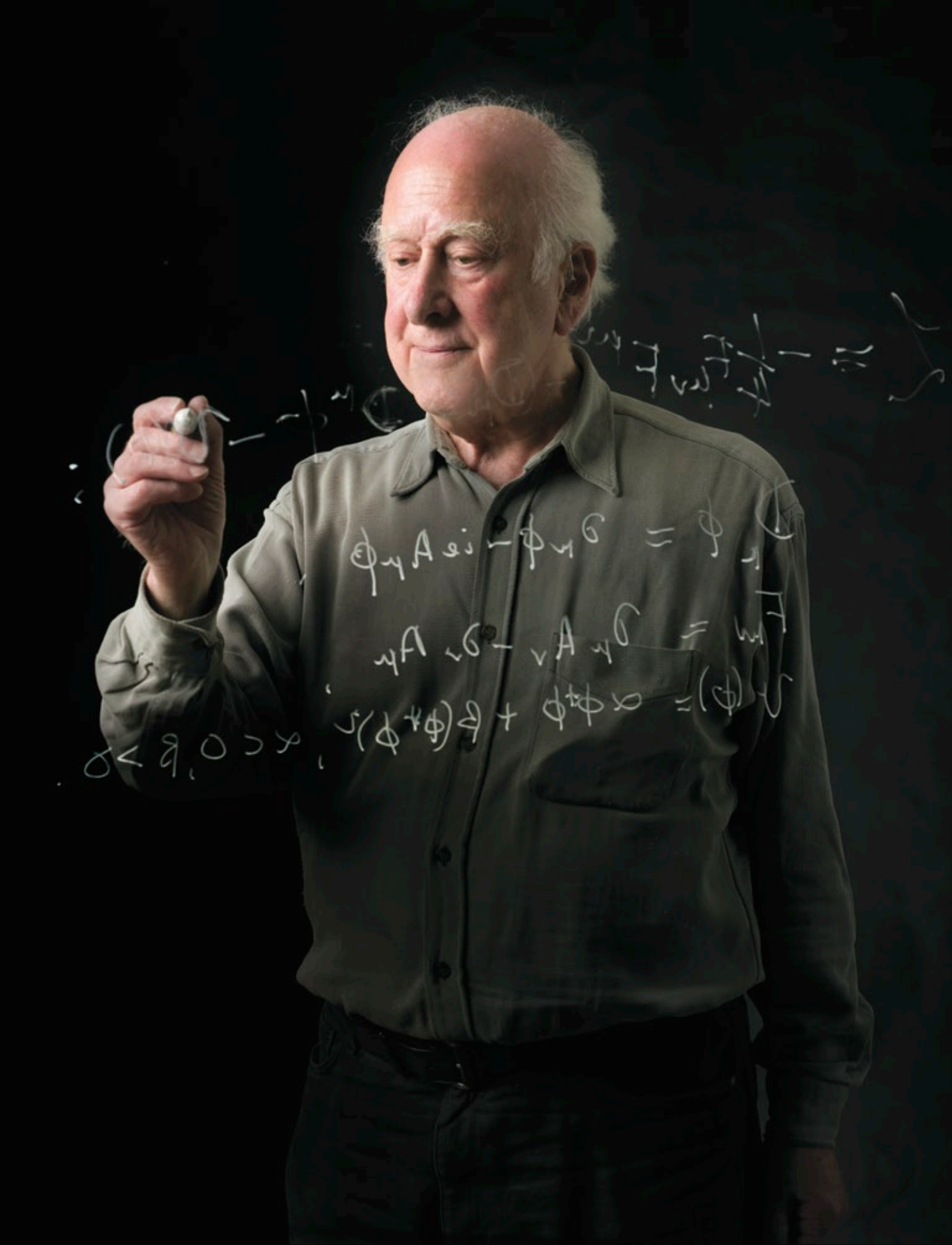
di Vittorio Del Duca

Higgs è il nome di una particella, di un modello e di un meccanismo matematico, ma è soprattutto il nome del protagonista di un'affascinante avventura concettuale che ha portato a sintetizzare con coerenza e bellezza matematica le scoperte di numerosi e importanti fisici della seconda metà del '900. Il meccanismo di Higgs è l'intuizione finale, la soluzione elegante e l'invito alla scoperta della prova sperimentale, il bosone di Higgs. Vittorio Del Duca ha conosciuto Peter Higgs quando, già fisico teorico, lavorava a Edimburgo prima di trasferirsi ai Laboratori Nazionali di Frascati dell'Infn, il cuore della ricerca sulle particelle in Italia. Il loro rapporto di amicizia è stato lo spunto per una conversazione informale a casa di amici comuni sulla genesi di un'idea che dalle premesse alle ultime conseguenze anima la comunità da quasi 50 anni. Oggi, con l'avvio di Lhc, quella stessa idea sta offrendo per la prima volta ai fisici di tutto il mondo l'occasione di completare il quadro rappresentativo delle particelle elementari e delle loro interazioni. È riportato in queste pagine solo un estratto del lungo dialogo; nella versione integrale dell'intervista, pubblicata sul sito di *Asimmetrie* (www.asimmetrie.it), è ripercorso con cura di dettagli storici e scientifici il ricco racconto di un'intuizione. [Francesca Scianitti]

V. Del Duca La storia della sua fama ha inizio negli anni '60. A noi oggi sono noti i presupposti di certe intuizioni, ma per lei e per i fisici della sua generazione che cosa era già chiaro e che cosa, invece, era completamente avvolto dall'oscurità?

P. Higgs Il mio coinvolgimento nella fisica delle particelle ebbe inizio con l'assegnazione della docenza a Edimburgo, nel 1960. Già prima di assumere quell'incarico, tuttavia, ebbi l'occasione di entrare in contatto con alcuni membri della comunità dei fisici delle particelle, partecipando alla Scuola Estiva Scozzese al college di Newbattle Abbey, fuori Edimburgo. E nella cripta del college, di notte, un gruppo di studenti era solito discutere di fisica: erano Cabibbo, Glashow, Veltman e Derek Robinson. Da parte mia, non potei partecipare alle loro discussioni, perché in quanto membro del comitato organizzativo mi fu assegnato il compito di acquistare e custodire il vino per la cena e dovevo alzarmi presto! Anni dopo, quando conobbi Cabibbo personalmente, mi confidò che le conversazioni notturne alla Scuola Estiva erano state lubrificate da parecchio vino trafugato dal mio stoccaggio davvero poco sicuro. Ed ecco come cominciai.

> Peter Higgs ritratto in occasione della sua visita al Cern, nella primavera del 2008.



V.DD. **Come iniziò a dedicarsi agli argomenti che la portarono a concepire il Meccanismo di Higgs?**
P.H. Iniziata la docenza a Edimburgo, quello stesso anno, ebbi l’occasione di leggere l’articolo di Yoichiro Nambu (premio Nobel per la fisica 2008 con Makoto Kobayashi e Toshihide Maskawa) e Giovanni Jona Lasinio (sulla rottura spontanea della simmetria chirale): l’idea che vi era suggerita mi affascinò a tal punto che decisi di dedicarmi a questo campo di ricerca. In seguito, Jeffrey Goldstone mostrò che quando una simmetria è rotta spontaneamente in una teoria relativistica, si ottengono particelle con massa nulla, i bosoni di Goldstone. Lo stesso Goldstone, Abdus Salam e Steven Weinberg pubblicarono la dimostrazione di questo teorema su *Physical Review* nel 1962. Ciò turbò molte persone e anche me, perché se dalla rottura spontanea ci si aspettano particelle senza spin prive di massa, queste dovrebbero essere semplici da produrre e da rivelare. Tuttavia, non se ne aveva alcuna evidenza sperimentale. Il mio primo breve articolo del 1964 stabiliva un modo per svincolarsi dal teorema di Goldstone, combinando la rottura spontanea di simmetria con una teoria di gauge. Così, l’articolo breve arrivò sulla scrivania dell’*editor* di *Physics Letters* al Cern e ne fu accettata la pubblicazione. L’avevo scritto molto rapidamente: c’erano infatti segni di poca cura nella scrittura. Realizzai quindi che il passo successivo doveva essere osservare cosa accade nell’esempio più semplice possibile, ossia

in elettrodinamica quantistica: la settimana successiva scrissi il secondo articolo ed ecco ciò che prese il nome di Modello di Higgs.
V.DD. **Come fu preso questo risultato dalla comunità dei fisici delle particelle?**
P.H. L’articolo, intanto, fu rifiutato... (ride) Inviai anche questo secondo articolo all’*editor* di *Physics Letters* al Cern, il quale, per qualche ragione che non capisco ancora oggi, aveva accettato il primo. Beh, fu enigmatico per me che nel primo articolo accettasse la semplice rappresentazione matematica del fatto che c’è un modo per evitare il teorema di Goldstone e che rifiutasse invece un articolo nel quale davo un esempio e mostravo come questo accadeva effettivamente. E l’esempio era molto più interessante, dal punto di vista della fisica. Ricevetti un cortese rifiuto e l’invito a inviare l’articolo a un’altra rivista. Estesi l’articolo, ma non lo rimandai indietro; conclusi che non avevano capito di cosa stavo parlando e decisi di mandarlo dall’altra parte dell’Atlantico. La versione estesa fu così pubblicata su *Physical Review Letters*. Quando accettò l’articolo, il *referee* mi chiese di commentare il lavoro dei fisici belgi Robert Brout e François Englert. Il giorno in cui il mio articolo arrivò all’ufficio editoriale di *Physical Review Letters*, infatti, era lo stesso giorno in cui pubblicarono l’articolo di Englert e Brout sulla generazione di massa di particelle a spin unitario: era sostanzialmente la stessa cosa, ottenuta però in un altro modo. Vent’anni dopo incontrai Nambu per la prima

a.
Peter Higgs durante la conversazione con Vittorio Del Duca a Edimburgo, nel dicembre del 2008.

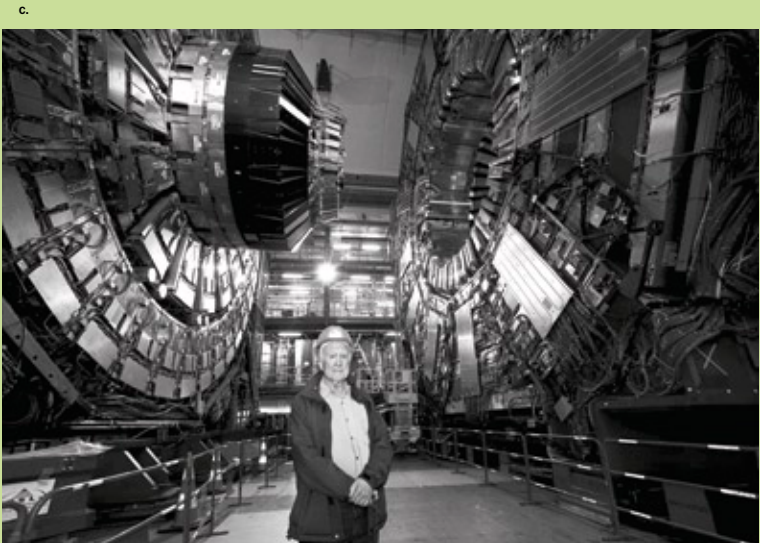
b.
Peter Higgs in una rappresentazione del pittore londinese Ken Currie, del 2008.
Il quadro è ospitato alla *School of Informatics* dell’Università di Edimburgo, in onore di Christopher Longuet-Higgins, chimico teorico e scienziato cognitivista, uno dei padri degli studi sull’intelligenza artificiale, del quale Higgs fu studente al King’s College di Londra.

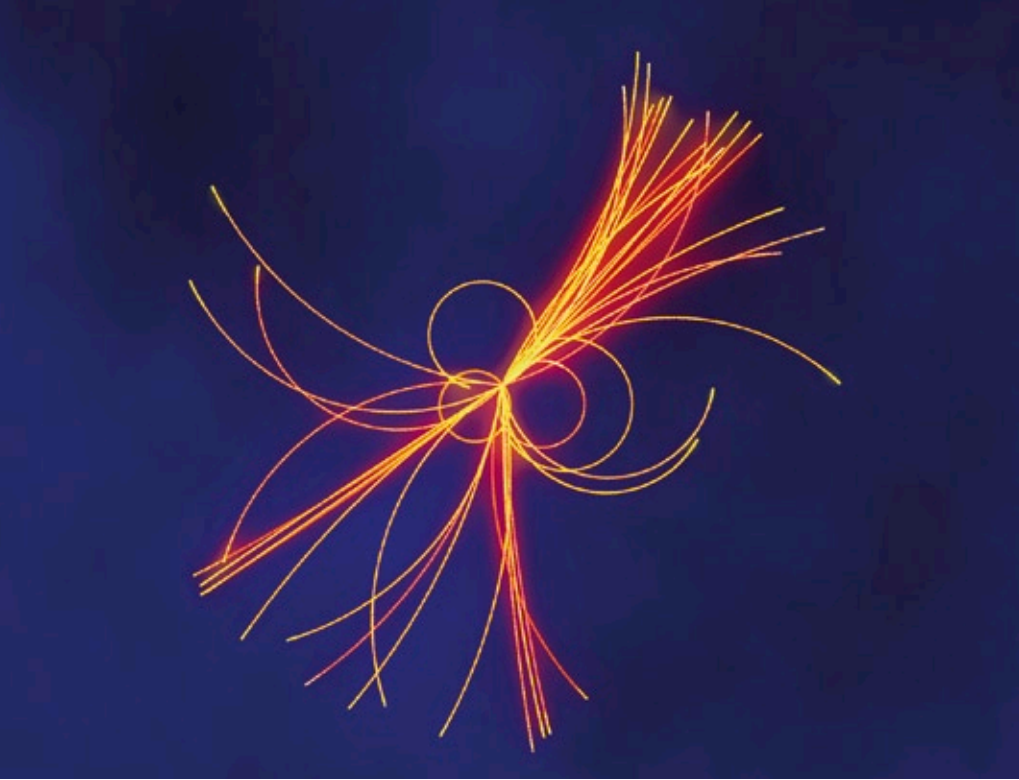


volta; mi disse che era stato lui ad accettare il mio articolo per *Physical Review Letters*. Penso che fosse leggermente seccato di non averci pensato lui stesso, ma pare che uno dei suoi figli fosse stato molto malato e questo l’aveva fatto rimanere un po’ indietro. Diversamente sono convinto che avrebbe trovato la stessa cosa piuttosto rapidamente.
V.DD. **Ok, che cosa accade dopo? Ad eccezione del referee di Physics Letters, come fu accettato dalla comunità nel suo insieme?**
P.H. Una delle prime reazioni fu una lettera di Walter Gilbert (biochimico e fisico statunitense, premio Nobel per la chimica nel 1980), nella quale si diceva che mi sbagliavo. Opponeva alcune obiezioni tecniche alle quali feci fatica a rispondere subito, perché avevo fatto due cose che non si conciliavano ancora esattamente. Ebbi effettivamente da considerare le conseguenze del mio modello nella teoria quantistica e non ci fu nulla da fare fino all’anno seguente, quando presi un anno sabbatico in North Carolina. E questo ci porta all’estate del 1965. Dopo avere lavorato sui dettagli del modello, scrissi l’articolo esteso che fu pubblicato su *Physical Review* nel 1966; la fase successiva, in quanto a reazioni, venne la primavera seguente. Il 15 e il 16 marzo del 1966 furono praticamente i giorni più faticosi della mia vita: tenni un seminario all’Istituto a Princeton il 15, ma ero stato precedentemente in contatto con Stanley Deser per i miei interessi sulla gravità e lui,

sapendo che stavo andando dall’altra parte dell’Atlantico, mi propose un *talk* a Boston. Così, il seminario del giorno seguente fu ad Harvard.
V.DD. **Come un pianista in grand tour.**
P.H. Sì, l’esperienza di Princeton mi intimidì inizialmente. Ma nonostante Klaus Hepp, un teorico di campo assiomatico, mi avesse avvisato che stavo per andare a dire delle fesserie, sopravvissi al seminario e mi fu detto, più tardi, che se non altro avevo convinto il fisico matematico Arthur Wightman che ciò che avevo fatto era corretto e che le teorie di gauge erano un’eccezione agli assiomi di questo teorema (di Goldstone).
V.DD. **Ok, ma da parte delle persone che erano più coinvolte con la teoria di gauge, con la teoria delle particelle, ci fu qualche reazione in quegli anni?**
P.H. Avvenne il giorno dopo, ad Harvard. Il seminario di Harvard fu più una conversazione che un monologo. Alla fine del seminario, Sheldon Lee Glashow (Nobel per la fisica 1979 con Steven Weinberg e Abdus Salam per la formulazione della teoria elettrodebole) disse: “Hai ottenuto un bel modello, Peter”. Ma non si accorse che la cosa aveva a che fare con il suo lavoro! (ride) Non lo disse, ma chiaramente pensava che il mio risultato fosse giusto una curiosità. Credo che il problema fosse che quel seminario divenne a tal punto un dialogo tra me e i membri dell’auditorio che non ebbi il tempo di dire cosa avevo fatto con questo modello. Li

c.
Peter Higgs ripreso davanti al rivelatore Cms durante la visita a Lhc nel 2008.





d.

d.
Simulazione del decadimento
del bosone di Higgs.



e.

e.
Peter Higgs durante la visita
al rivelatore Cms nel 2008.

convinsi del fatto che non stavo dicendo fesserie, ma non che ciò che dicevo aveva delle conseguenze pratiche.

V.DD. **Quando la sua idea cominciò ad essere percepita come un’idea d’avanguardia all’interno della comunità? Quando divenne famoso?**

P.H. Divenni famoso nel 1972, dopo la conferenza al Fermilab. Uno dei miei colleghi, Ken Peach, tornò da quella conferenza e mi disse: “Peter, sei famoso!” Ma c’erano già state alcune conseguenze del mio lavoro. Non so se Salam lesse mai l’articolo, ma certamente venne a sapere ciò che avevo fatto. Weinberg ne venne certamente a conoscenza, perché nel suo articolo del 1967, che era essenzialmente la teoria elettrodebole, usava il mio lavoro. Ebbi l’impressione in seguito che, avendo perso il mio seminario, avesse appreso qualcosa da Bruno Zumino che era stato al seminario di Harvard: quella era la prima volta che incontravo Zumino e certamente sapeva molto del mio lavoro e lo capiva.

V.DD. **Divenne quindi una lunga attesa... Nessuno sapeva quale massa dovesse avere il bosone di Higgs e non era chiaro**

quando e dove sarebbe stato scoperto...

P.H. Sì. Penso che l’articolo cruciale, in grado di catturare l’interesse dei fisici sperimentali, sia stato un articolo di Ellis, Gaillard e Nanopoulos del 1976, *Fenomenologia del bosone di Higgs*. Fu scritto all’epoca in cui fu costruito il collisore Sps (*Super Proton Synchrotron*, il collisore protone-antiprotone che iniziò a operare al Cern nel 1976). Così gli sperimentali furono messi in guardia: sapevano che avrebbero potuto trovare qualcosa nei loro dati.

V.DD. **So che è stato al Cern la scorsa primavera. Che impressione le ha fatto sapere che hanno costruito una macchina che costa parecchi miliardi di qualsiasi valuta si voglia usare, euro, dollari o sterline, per cercare qualcosa che è saltato fuori dalla sua mente?**

P.H. Beh, sono soddisfatto, certo. Tuttavia, temo che non sia stata una buona tattica assumere il bosone di Higgs come punto di forza di Lhc. Penso che non sia stato saggio enfatizzare così tanto quell’aspetto ai tempi del Lep (l’acceleratore Large Electron Positron collider, operativo al Cern dal 1989 al 2000), anche perché i fisici

sapevano che quello che il Lep stava per fare era di fatto molto di più. Applicherei la stessa critica alla propaganda associata a Lhc. Se non trovano il bosone di Higgs, chi finanzia più qualsiasi altra cosa?

V.DD **Se posso indagare un po’ più nel personale, questo circo generato intorno al suo nome la ha influenzata personalmente, ha avuto effetti di qualche tipo sulla sua vita personale, su di lei come persona?**

P.H. Dal lato scientifico mi ha dato una tale esagerata reputazione che quasi ha soffocato la mia successiva attività di ricerca. Ci fu un gap, potrei dire, durante il quale non feci poi molto. Quando tornai a essere più attivo, mi interessai alla supersimmetria, ma a quel punto ero davvero troppo vecchio per fare cose nuove: c’era già un tale background di nuova matematica coinvolta nella supersimmetria, che non avrei potuto assorbirlo tanto rapidamente quanto le persone che stavano ottenendo il loro PhD e che pubblicavano gli articoli. Così alla fine lasciai perdere, all’inizio degli anni ’80.

V.DD. **Non riusciva più a concentrarsi?**

P.H. No, era come se fossi diventato troppo ambizioso. Se mi fossi accontentato di lavorare su cose più semplici avrei potuto produrre ancora, ma avendo ottenuto un successo pretendevo di dedicarmi agli sviluppi più promettenti, come la supersimmetria, la supergravità e così via; ma non ero più in grado di apprendere tanto rapidamente. Un secondo aspetto mi influenzò probabilmente in un altro senso e certamente alla fine contribuì alla rottura del mio matrimonio: penso che a quel tempo mia moglie non comprendesse a fondo i miei successi e quanto fosse importante per me ciò che facevo, così quando cominciai a dare la priorità a ciò che riguardava la mia carriera, le conferenze e via dicendo, più che agli interessi per la mia famiglia, il matrimonio crollò. Questo ebbe come effetto immediato un periodo davvero poco produttivo.

V.DD. **Così, deve avere vissuto sentimenti contrastanti a causa della sua fama, una benedizione e una maledizione allo stesso tempo...**

P.H. Sì. Ebbe naturalmente un impatto tremendo sulla mia autostima: ora ero un

fisico teorico! Un impatto esagerato, direi... (ride) Prima del successo mi consideravo solo un *outsider*, perché il mio lavoro di tesi non era affatto sulla fisica delle particelle.

V.DD. **Lei sa che Leon Max Lederman (premio Nobel per la fisica nel 1988 e autore di un libro sul bosone di Higgs) ebbe l’ardire scherzoso di chiamare il bosone di Higgs, nel titolo del suo libro, *The goddamn particle*, la dannata particella.**

P.H. ... e l’editore non glielo permise.

V.DD. **... per ragioni ovvie, giusto? Così lo chiamò *The God particle*, la particella di Dio. Naturalmente, dato che era solo uno scherzo, non dovremmo dare alla cosa troppa importanza, ma la infastidì in qualche modo?**

P.H. Sì. Anche se non sono mai stato credente, pensai che quel titolo avrebbe potuto offendere inutilmente. Una volta però passai la notte in un piccolo Bed & Breakfast nel nord della Scozia, prima di prendere un traghetto per le Isole Orcadi. C’era una buona collezione di libri in quel posto, e cosa vi trovai se non “La particella di Dio”?!

Biografia

Vittorio Del Duca è ricercatore Infn ai laboratori Nazionali di Frascati, dove si occupa di fisica teorica nel campo delle particelle elementari. Ha svolto attività di ricerca allo Stanford Linear Accelerator Center in California e al Deutsches Elektronen-Synchrotron di Amburgo e ha insegnato all’università di Edimburgo.

Link sul web

<http://www.ph.ed.ac.uk/peter-higgs>

Versione integrale dell’intervista in italiano
www.asimmetrie.it

Versione integrale dell’intervista in inglese
www.Inf.infn.it/theory/delduca

Altre interviste
<http://cdsweb.cern.ch/record/1019670>

<http://physicsworld.com/cws/article/print/19750>

<http://wlap.physics.lsa.umich.edu/umich/mctp/conf/2001/sto2001/higgs>



L'assedio all'Higgs

Una sfida che continua da un quarto di secolo, dal Lep a Lhc.

di Chiara Mariotti

Il 10 settembre 2008 è stata una giornata memorabile. Il Cern è entrato in una nuova era di scoperte scientifiche: un fascio di protoni ha circolato nei due anelli di Lhc, il Large Hadron Collider, facendo il giro completo del più grande acceleratore al mondo.

È stato un momento di grande emozione seguito dalle televisioni di tutto il mondo. Un successo non solo per chi ha lavorato nella messa a punto dell'acceleratore, ma anche per i ricercatori che lavorano negli esperimenti che misureranno cosa accadrà quando i due fasci di protoni accelerati da Lhc si scontreranno.

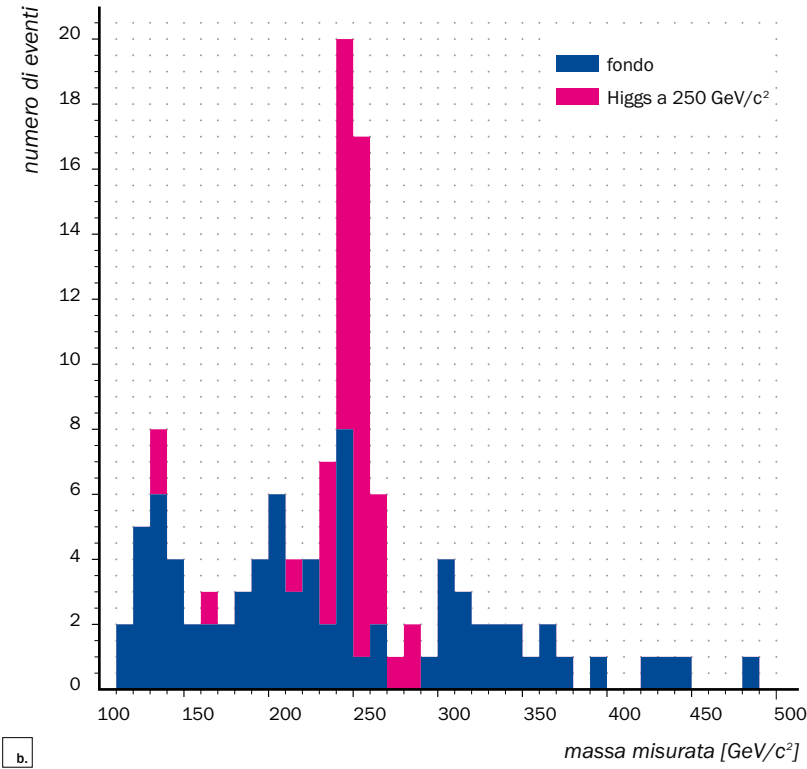
Tra i quattro esperimenti che compongono Lhc, Atlas (*A Toroidal LHC ApparatuS*) e Cms (*Compact Muon Solenoid*) hanno come scopo primario quello di capire l'origine della massa delle particelle, ovvero scoprire se il bosone di Higgs esista o meno. Saranno questi due esperimenti che finalmente, dopo quasi 40 anni di ricerche, riusciranno a dare una risposta definitiva all'enigma della massa. Studiando la struttura interna del mondo in questi ultimi decenni, siamo riusciti a raffigurarlo come costituito da particelle fondamentali (i leptoni e i quark – facenti parte della più vasta famiglia dei fermioni), che interagiscono tra loro scambiandosi energia e impulso tramite altre particelle (i bosoni). Il bosone di Higgs è la particella che corrisponde a una nuova interazione che spiega l'origine della massa. Si può anche immaginare l'Higgs come un “etere”, o una melassa, presente ovunque e in cui le particelle non si possono muovere alla velocità della luce, ma si muovono faticosamente con una certa inerzia, acquistando così massa. La teoria che descrive le particelle e le loro interazioni è il Modello Standard. Nel Modello Standard la massa del bosone di Higgs non è predetta esattamente, ma è prevista essere inferiore a 1.000 GeV/c² (equivalente a circa 10⁻²¹ grammi, ossia un millesimo di miliardesimo di miliardesimo di grammo, cioè pari alla massa di ben mille protoni).

L'esperimento Gargamelle al Cern nel 1973, la scoperta dei bosoni W e Z sempre al Cern nel 1983 (che hanno valso il premio Nobel a Carlo Rubbia), i quattro esperimenti al Lep (l'acceleratore precedente a Lhc, ospitato al Cern) e infine gli esperimenti al Tevatron (l'acceleratore di protoni e anti-protoni) al Fermilab (*Fermi National Accelerator Laboratory*), nei pressi di Chicago, hanno confermato il successo del Modello Standard. L'unico mattone mancante è proprio il bosone di Higgs, che finora è stato cercato senza successo. D'altronde l'energia degli acceleratori costruiti fino ad ora non consentiva l'esplorazione dell'intera regione di massa permessa dalla teoria. Solo Lhc potrà farlo, perché raggiungerà energie elevate (14 TeV, ovvero 14.000 GeV) potendo dunque produrre un Higgs anche di massa pari a 1.000 GeV/c², il limite superiore consentito dalla teoria.

L'Higgs è una particella che si disintegra (“decade”) immediatamente dopo la sua creazione, producendo una coppia di fermioni o di bosoni (W e Z o fotoni). Anche i bosoni W e Z a loro volta decadono immediatamente in coppie di fermioni. Quello che dunque si cerca negli esperimenti sono le particelle provenienti dalla disintegrazione del bosone di Higgs. Queste particelle sopravvissute hanno caratteristiche simili a quelle che vengono prodotte da altri fenomeni dovuti alle collisioni ma, se ne ricostruiamo la massa totale, essa corrisponderà alla massa dell'Higgs. È dunque necessario accumulare un campione statistico sufficiente a osservare un picco nella distribuzione della massa misurata delle particelle prodotte. Sarà come cercare una montagna (il *segnale*) che spicca tra un profilo di colline (il *fondo*), e tutto dipende da quanto sono alte le colline e la montagna, ovvero da quanti eventi di Higgs si riuscirà a produrre e identificare (vd. fig. b).

Al Lep, l'acceleratore precedente a Lhc, gli urti avvenivano tra due particelle elementari (elettroni e positroni). Poiché la semplicità dello stato iniziale (un elettrone e un positrone, particelle puntiformi e prive di struttura) viene trasmessa allo stato finale, se l'Higgs avesse avuto una massa accessibile al Lep, la composizione degli eventi sarebbe stata molto semplice, includendo solamente l'Higgs e un bosone Z, che a loro volta decadono in due particelle ciascuno. Lo stato finale al Lep, dopo

a.
Due ingegneri controllano uno dei 1.232 magneti dipolari distribuiti lungo il tunnel di Lhc che fino al 2000 ospitava il suo precursore, il Lep (Large Electron-Positron Collider). Il tunnel si trova a 100 m di profondità sotto la periferia della città di Ginevra, alla frontiera tra Svizzera e Francia.



b.
Se l'Higgs avesse una massa di 250 GeV/c², dopo un anno di presa dati si otterrebbe un diagramma della distribuzione della massa misurata simile a quello riportato in figura. In blu si vedono gli eventi che potrebbero essere interpretati come segnali di Higgs ma non lo sono (il rumore di fondo). Si vede come il segnale spicca intorno ai 250 GeV/c² (in rosso), ovvero che gli eventi ricostruiti che provengono da un Higgs, si accumulano a un particolare valore della massa. Il segnale è molto pulito perché il picco rosso è stretto e ben visibile e il fondo blu è abbastanza regolare e mai troppo alto. Sono questi gli eventi che si spera di osservare in Atlas e Cms per la scoperta dell'Higgs!

i decadimenti, sarebbe stato dunque formato da solo 4 particelle (leptoni o quark). Le caratteristiche degli eventi attesi erano semplici, come mostrato in fig. c. Le efficienze previste erano alte. L'Higgs sarebbe stato individuato anche se ci si aspettava la produzione di solo una decina di eventi. I quattro esperimenti al Lep (Aleph, Delphi, L3 e Opal) hanno disperatamente cercato l'evidenza di produzione del bosone di Higgs senza trovarne traccia.

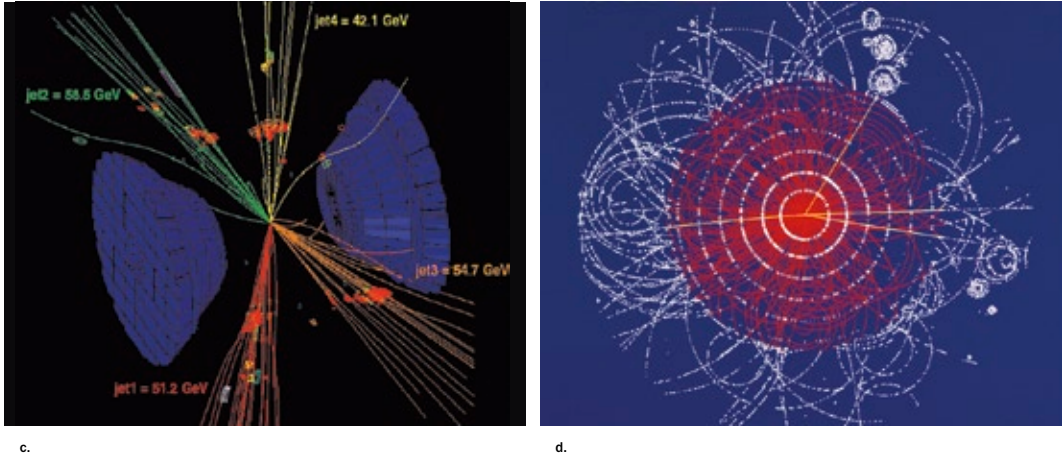
Gli ultimi mesi di presa dati al Lep nell'anno 2000, quando l'energia raggiunse il massimo possibile, videro un vero assedio al bosone di Higgs. I fisici sperimentali erano incollati ai terminali; telefonarsi in piena notte era normale perché tutti sapevano di essere svegli a cercare di migliorare le analisi, cercando di riuscire a estrarre dai dati tutte le informazioni possibili per capire se effettivamente si stava producendo l'Higgs o se sfortunatamente non era alla portata del Lep e si poteva dunque fermare la macchina per lasciare il futuro a Lhc. Erano giorni in cui una sana competizione animava i fisici delle varie collaborazioni per assicurarsi di essere i primi a rivelarlo, ma nello stesso tempo si lavorava insieme perché più passava il tempo più diventava evidente che il campione statistico del

singolo esperimento non sarebbe stato sufficiente ed era necessario mettere insieme i vari risultati. Alla fine del 2000, ovvero con la fine del Lep, combinando i risultati dei quattro esperimenti e non avendo nessuna evidenza di produzione di segnale, si ottenne un limite inferiore sulla sua massa di 114,3 GeV/c², il che significa che la massa di questa particella, se esistente, deve essere superiore a questo valore. A quel punto il testimone passò agli acceleratori adronici, nei quali si scontrano adroni (protoni in Lhc) e non più leptoni. Nel 2001 il Tevatron, l'acceleratore del Fermilab di Chicago, inaugurò una nuova era con collisioni di protone-antiprotone a 1,96 TeV (1.960 GeV), aprendo la strada verso nuove masse ancora inesplorate. I due esperimenti al Tevatron (Cdf e DZero) da anni lavorano accanitamente per riuscire a estrarre un possibile segnale di Higgs. I ricercatori si aspettano di raccogliere circa 250 candidati di Higgs, nel caso la sua massa sia compresa tra i 110 e i 180 GeV/c². Gli eventi aspettati sono molti, ma la ricerca in un acceleratore adronico è molto più ardua rispetto a quella in uno leptonico (come lo era il Lep), perché gli urti avvengono tra due particelle composte (protoni e anti-protoni sono adroni, ovvero particelle composte

da quark e gluoni). Lo stato finale è dunque complesso, perché coesistono tutti i prodotti degli urti dei vari gluoni e quark appartenenti ai due adroni iniziali. Il numero di particelle nello stato finale è molto alto (si hanno un centinaio di particelle prodotte per ogni evento), e dunque individuare tra queste i prodotti del decadimento dell'Higgs è un'impresa non facile.

Per la ricerca di particelle di massa ignota, nonostante lo stato finale sia più complesso, un collisionatore adronico è preferibile a un collisionatore leptonico perché si possono raggiungere energie molto più alte (nello stesso anello che è usato da Lhc si acceleravano elettroni fino ad energie di 100 GeV, mentre in Lhc si accelereranno protoni a 7.000 GeV). Inoltre l'urto avviene tra quark e/o gluoni che trasportano una frazione variabile dell'energia del protone, permettendo di esplorare uno spettro di masse molto ampio.

I fisici al Tevatron sono partiti verso una nuova frontiera e stanno spingendo al limite le loro analisi per riuscire a identificare la frazione più alta possibile di queste centinaia di eventi di Higgs aspettati tra i milioni di altri eventi prodotti. Il quadro sperimentale è in continua evoluzione: proprio l'estate scorsa dal



Tevatron è arrivata la notizia che i loro dati escludono che l'Higgs abbia una massa di circa 170 GeV/c². La prima metà dei dati analizzata sembra non indicare la presenza dell'Higgs in tutta la zona in cui sono sensibili, ma i risultati non sono ancora conclusivi.

Questo ha delle ripercussioni sullo stato d'animo dei fisici del Cern. Da un lato si attendono con ansia i risultati del Tevatron e la curiosità scientifica è insopprimibile: l'Higgs esiste davvero oppure è un'altro il meccanismo che dà origine alla massa delle particelle? D'altro canto, il senso di competizione è forte e si spera che sia il Cern a vivere questo momento glorioso e determinante per la fisica delle particelle.

A partire dal prossimo autunno Lhc inizierà a far collidere i fasci. Ci saranno ben 40 milioni di collisioni dei fasci al secondo, producendo circa un'interazione tra protone e protone ogni milionesimo di secondo. Valori da record per un acceleratore di particelle! L'Higgs resta un "prodotto" raro, dato che potrà essere creato solo ogni miliardo di eventi. Nonostante il fondo (ovvero gli eventi che potrebbero essere interpretati come segnali di Higgs ma non lo sono) sia dominante, la quantità enorme di eventi che produrrà Lhc permetterà di affinare la selezione e scoprire se esiste l'Higgs in tutto lo spettro di masse permesso dalla teoria. Saranno prodotti a sufficienza anche stati finali molto facilmente riconoscibili, per esempio quelli con 4 leptoni (muoni oppure elettroni) ad alto impulso e ben isolati dal resto delle altre particelle prodotte (vd. fig. d).

In Lhc i due esperimenti dedicati alla ricerca dell'Higgs (Atlas e Cms) gareggeranno in una olimpiade scientifica per chi potrà affermare per primo di aver visto l'Higgs. Bisognerà sedersi insieme poi e combinare le misure per ottimizzare le potenzialità di scoperta. Purtroppo non accadrà di "scoprire" un evento di Higgs al primo scontro dei fasci, ci vorrà molto lavoro e tempo per raggiungere la convinzione scientifica della scoperta.

c.
Un evento osservato nell'esperimento Delphi del Lep.
L'elettrone e il positrone incidenti hanno interagito e prodotto 2 bosoni nello stato finale. Questi a loro volta decadono in 2 quark ciascuno, che a loro volta producono un jet ciascuno. Un jet è un insieme di particelle che hanno la stessa origine e sono racchiuse in un cono con uno stretto angolo di apertura. La massa può essere determinata dalle variabili cinematiche (in questo caso l'energia) dei due jet di decadimento. Se si associa il jet 1 al jet 2 e il jet 3 al jet 4, si risale alla produzione di due bosoni Z. Viceversa, se si sceglie l'accoppiamento del jet 1 con il 4 e il 2 con il 3, si ha un bosone Z e un candidato di Higgs di massa 113 GeV. L'analisi su eventi simulati, tuttavia, determinava che questo evento era compatibile con la produzione di due bosoni Z e che quindi, probabilmente, non si era prodotto un bosone di Higgs.

d.
Questa figura illustra cosa ci si aspetta di vedere in un evento di Higgs che decade in 4 muoni in Atlas. I 4 muoni attraversano tutto il rivelatore e sono tracce abbastanza dritte in quanto hanno un impulso alto. Tutte le altre tracce prodotte dall'interazione tra gli altri quark e gluoni hanno un impulso minore e dunque hanno una grande curvatura oppure "spiraleggiano" nell'intenso campo magnetico.

Biografia		
Chiara Mariotti è ricercatrice Infn presso la sezione di Torino. Ha svolto attività di ricerca in fisica delle alte energie al Fermilab e al Cern. Ha coordinato per		10 anni il gruppo di fisica dell'esperimento Delphi del Lep e attualmente coordina il gruppo che ricerca il bosone di Higgs all'esperimento Cms di Lhc.
Link sul web		
www.cern.ch		
http://public.web.cern.ch/Public/en/Science/Higgs-en.html		
http://lepewwg.web.cern.ch/LEPEWWG		
http://arXiv.org/pdf/0902.0293		

[as] con altri occhi

Topolino al Cern.

di Alessandro Bencivenni,

sceneggiatore

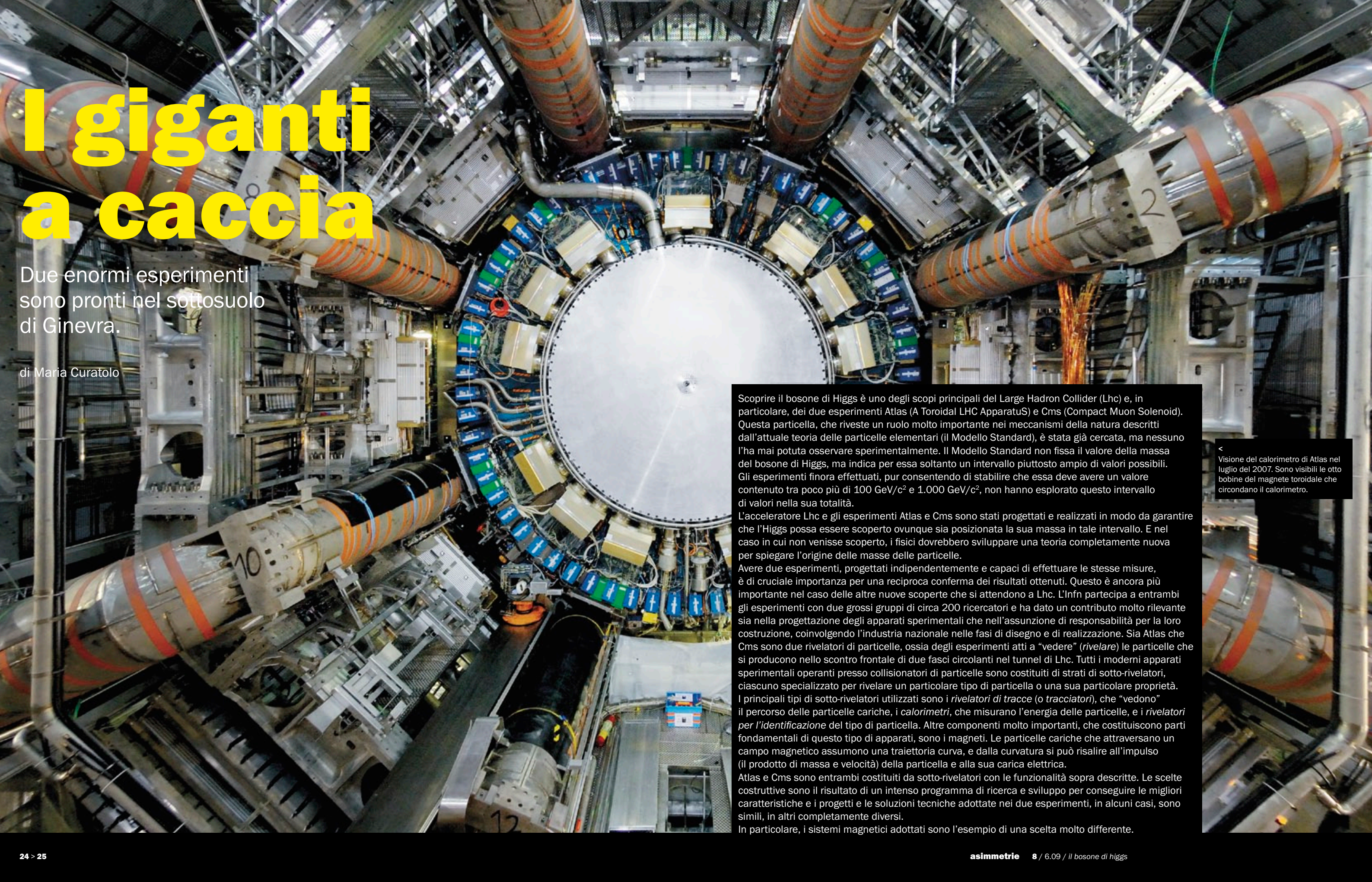


Pur avendo una formazione umanistica e non scientifica, ho sempre nutrito interesse per l'astrofisica, poiché risponde in fondo alle stesse domande della filosofia. Il mio lavoro si svolge in tutt'altro campo (sono sceneggiatore e critico cinematografico), ma ho accolto volentieri l'invito in questa rubrica. Lo faccio con tre brevissime testimonianze: come autore, spettatore e critico. All'inizio della mia carriera scrivevo sceneggiature per *Topolino*. Trovandomi a Ginevra, visitai il Cern e presi spunto dall'annuncio della costruzione del nuovo acceleratore per una storia che fu pubblicata nell'85: *Topolino e l'acceleratore nucleare*. Per l'occasione, mi feci scrupolo di fornire alcune foto degli impianti al disegnatore, Massimo De Vita, per garantire a quella vicenda di fantasia un'attendibilità divulgativa. Con mia sorpresa, gli scienziati del Cern vennero a conoscenza del fumetto e fui contattato dal direttore della biblioteca che me ne chiese una copia. Di recente, dopo l'ultimazione di Lhc, quella vecchia storia è tornata di attualità e una troupe del TG ha dato conto della presenza al Cern di quelle tavole. Nulla mi lusinga e mi diverte più dell'idea che quella storiella sia esposta in un solenne tempio della scienza dove si investiga l'origine dell'Universo. Come spettatore, non posso fare a meno talvolta di sorridere per le eresie scientifiche contenute nei film. Purtroppo, non ho avuto occasione di gettare un ponte fra il mondo della finzione e quello della ricerca, né sembra probabile che questo possa accadere in futuro, visto che mi occupo per lo più di cinema comico. Mi è di conforto, tuttavia, una notizia curiosa: che proprio l'esponente di un cinema che apparentemente si colloca agli antipodi di ogni scrupolo di attendibilità scientifica (Jerry Zucker, il regista dell'esilarante *Aereo più pazzo del mondo*), si sia fatto carico di fondare con un fisico il programma *Science & Entertainment Exchange*, finalizzato a garantire una base scientificamente più corretta alle finzioni hollywoodiane.

Al di là dei rapporti diretti tra cinema e scienza, credo che l'influenza reciproca più importante sia da ricercarsi sul piano filosofico, ossia sul concetto che abbiamo oggi di realtà oggettiva. In un mio recente libro (Alessandro Bencivenni, *Ricordare sognare sceneggiare*, Le Mani, Recco 2009), mi sono avventurato in uno spericolato paragone fra il paradosso Einstein-Podolsky-Rosen (EPR) e il film di Kieslowski *La doppia vita di Veronica*. Come il paradosso EPR analizza il legame apparentemente misterioso che condiziona reciprocamente due particelle dopo la loro separazione, così il film di Kieslowski indaga il legame misterioso fra due ragazze omonime, i cui destini appaiono condizionarsi a vicenda anche se le due non hanno modo né di conoscersi, né di comunicare. Qui non si tratta ovviamente di azzardare un confronto diretto, ma solo un'analogia simbolica. Il paradosso EPR ha infatti implicazioni interessanti sulla concezione della realtà. È stato ipotizzato che le due particelle appartengano a due universi caratterizzati da sorti diverse e tuttavia collegate: universi molteplici, tali che mentre l'osservazione si concentra su uno dei possibili stati di una particella, tutti gli altri esistono contemporaneamente, evolvendosi ciascuno secondo la sua legge. Ciò che mi affascina, come narratore, è che questo principio non sembra lontano da quello che presiede agli sviluppi alternativi di una storia. Oggi infatti, al concetto lineare e unidirezionale di trama si affianca sempre più spesso la sperimentazione di strutture narrative alternative o sovrapposte. In conclusione, ogni escursione nel genere fantastico ci obbliga a interrogarci sul senso di realtà, che ha perso in generale la sua absolutezza, tanto che il principio di indeterminazione è ormai invalso anche nel senso comune. Il concetto di mistero non è più relegato alla sfera dell'immaginazione, ma ci appare connaturato alla natura stessa del mondo fisico. Così com'è apparentata, sia in campo estetico che scientifico, la sfida della ricerca.

a.
Una tavola della storia a fumetti *Topolino e l'acceleratore nucleare*, comparsa sul n. 1563 di Topolino il 10 novembre 1985. La storia, sceneggiata da Alessandro Bencivenni e disegnata da Massimo De Vita, è ambientata al Cern di Ginevra nel periodo in cui era in costruzione il Lep, all'epoca il più grande acceleratore di particelle esistente, oggi sostituito da Lhc.

a.



I giganti a caccia

Due enormi esperimenti sono pronti nel sottosuolo di Ginevra.

di Maria Curatolo

Scoprire il bosone di Higgs è uno degli scopi principali del Large Hadron Collider (Lhc) e, in particolare, dei due esperimenti Atlas (A Toroidal LHC ApparatuS) e Cms (Compact Muon Solenoid). Questa particella, che riveste un ruolo molto importante nei meccanismi della natura descritti dall'attuale teoria delle particelle elementari (il Modello Standard), è stata già cercata, ma nessuno l'ha mai potuta osservare sperimentalmente. Il Modello Standard non fissa il valore della massa del bosone di Higgs, ma indica per essa soltanto un intervallo piuttosto ampio di valori possibili. Gli esperimenti finora effettuati, pur consentendo di stabilire che essa deve avere un valore contenuto tra poco più di $100 \text{ GeV}/c^2$ e $1.000 \text{ GeV}/c^2$, non hanno esplorato questo intervallo di valori nella sua totalità.

L'acceleratore Lhc e gli esperimenti Atlas e Cms sono stati progettati e realizzati in modo da garantire che l'Higgs possa essere scoperto ovunque sia posizionata la sua massa in tale intervallo. E nel caso in cui non venisse scoperto, i fisici dovrebbero sviluppare una teoria completamente nuova per spiegare l'origine delle masse delle particelle.

Avere due esperimenti, progettati indipendentemente e capaci di effettuare le stesse misure, è di cruciale importanza per una reciproca conferma dei risultati ottenuti. Questo è ancora più importante nel caso delle altre nuove scoperte che si attendono a Lhc. L'Infn partecipa a entrambi gli esperimenti con due grossi gruppi di circa 200 ricercatori e ha dato un contributo molto rilevante sia nella progettazione degli apparati sperimentali che nell'assunzione di responsabilità per la loro costruzione, coinvolgendo l'industria nazionale nelle fasi di disegno e di realizzazione. Sia Atlas che Cms sono due rivelatori di particelle, ossia degli esperimenti atti a "vedere" (*rivelare*) le particelle che si producono nello scontro frontale di due fasci circolanti nel tunnel di Lhc. Tutti i moderni apparati sperimentali operanti presso collisionatori di particelle sono costituiti di strati di sotto-rivelatori, ciascuno specializzato per rivelare un particolare tipo di particella o una sua particolare proprietà. I principali tipi di sotto-rivelatori utilizzati sono i *rivelatori di tracce* (o *tracciatori*), che "vedono" il percorso delle particelle cariche, i *calorimetri*, che misurano l'energia delle particelle, e i *rivelatori per l'identificazione* del tipo di particella. Altre componenti molto importanti, che costituiscono parti fondamentali di questo tipo di apparati, sono i magneti. Le particelle cariche che attraversano un campo magnetico assumono una traiettoria curva, e dalla curvatura si può risalire all'impulso (il prodotto di massa e velocità) della particella e alla sua carica elettrica.

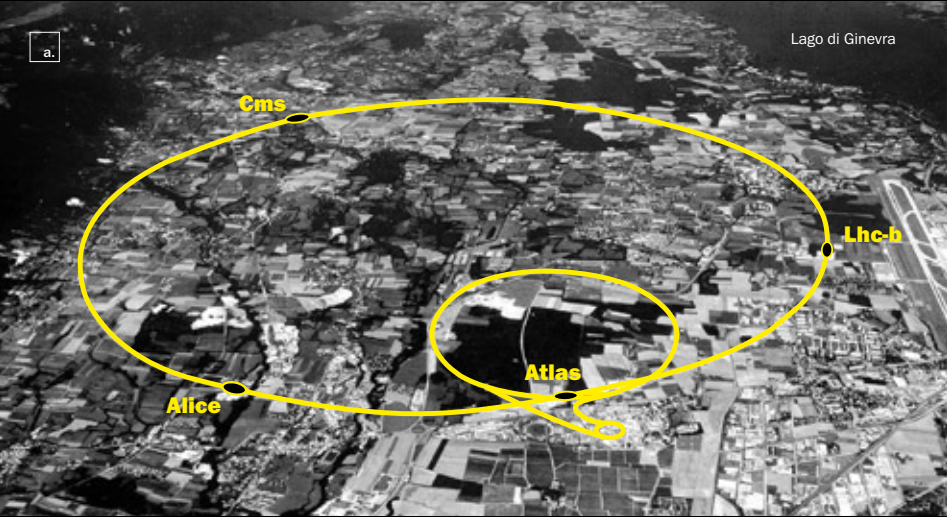
Atlas e Cms sono entrambi costituiti da sotto-rivelatori con le funzionalità sopra descritte. Le scelte costruttive sono il risultato di un intenso programma di ricerca e sviluppo per conseguire le migliori caratteristiche e i progetti e le soluzioni tecniche adottate nei due esperimenti, in alcuni casi, sono simili, in altri completamente diversi. In particolare, i sistemi magnetici adottati sono l'esempio di una scelta molto differente.

< Visione del calorimetro di Atlas nel luglio del 2007. Sono visibili le otto bobine del magnete toroidale che circondano il calorimetro.

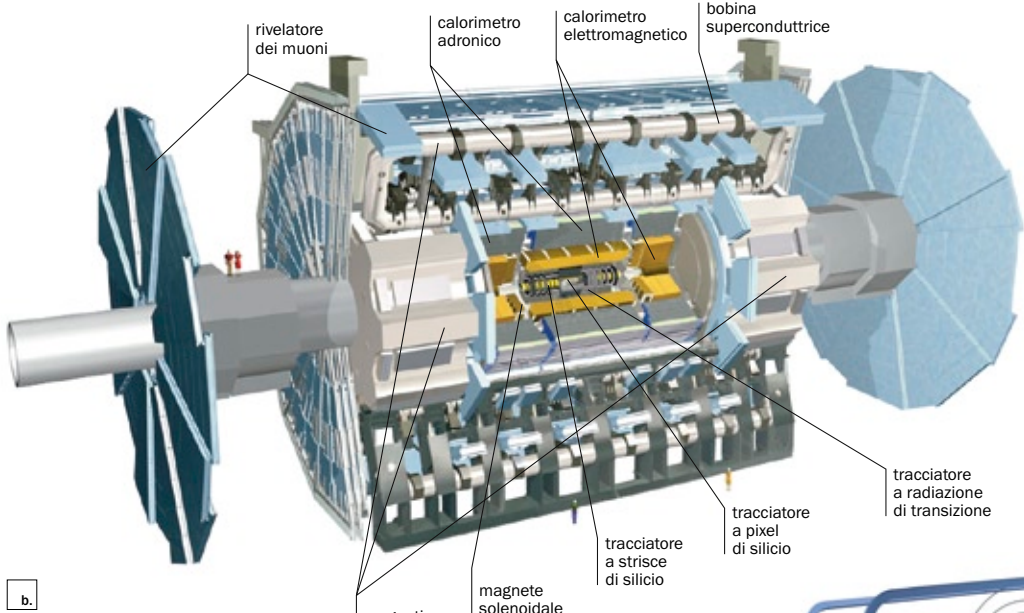
Una inconfondibile caratteristica di Atlas, infatti, è il suo enorme sistema magnetico. Esso consiste di otto avvolgimenti di cavo superconduttore a forma rettangolare, percorsi da elevate correnti, lunghi ben 25 m, alti circa 5 m e sistemati a raggiera attorno alla linea dei fasci. Al loro interno si genera un campo magnetico *toroidale* (così detto perchè il volume magnetizzato ha la forma di un anello cilindrico), nel quale sono disposti rivelatori in grado di “tracciare” le particelle. Una importante caratteristica di questo magnete è di poter essere usato per la misura di precisione dei muoni in modo autonomo, anche senza l’ausilio di altre parti dell’apparato. Infatti, l’assenza di ferro che elimina il limite dovuto allo *scattering multiplo* (piccole deviazioni, dovute all’interazione con la materia, che perturbano la traiettoria “ideale” delle particelle) e la grande estensione del campo magnetico consentono una misura dell’impulso con ottima precisione. Altri due magneti toroidali forniscono in Atlas il campo magnetico necessario alla misura delle particelle prodotte con un angolo piccolo rispetto alla linea dei fasci collidenti. Per la misura dell’impulso delle particelle cariche nel tracciatore interno è utilizzato un solenoide superconduttore che fornisce un campo magnetico di intensità pari a 2 Tesla: un valore 50.000 volte più intenso del campo magnetico terrestre. Il sistema magnetico di Cms, invece,

è costituito da un solo grande solenoide superconduttore. Esso fornisce al suo interno un campo magnetico molto intenso (di 4 tesla) nel quale sono immersi il tracciatore interno e i calorimetri. La struttura del magnete comprende inoltre quattro cilindri di materiale ferromagnetico posti all’esterno del solenoide e concentrici con esso. Tra tali strati sono posizionati i rivelatori di muoni. Nel caso di Cms, la precisione di misura dell’impulso dei muoni viene ottenuta combinando l’informazione delle tracce dei rivelatori per muoni con quella del tracciatore interno vicino al punto di collisione tra i fasci. Mentre i sistemi magnetici dei due esperimenti sono così differenti, le tecnologie utilizzate per la realizzazione dei rivelatori di muoni sono le stesse: per esempio, nella regione centrale sono utilizzati rivelatori a gas a *deriva di carica* per la misura di precisione delle tracce e i cosiddetti *Resistive Plate Chambers*, rivelatori con un’ottima risoluzione temporale (ovvero la capacità di distinguere due segnali che si susseguono a brevissimo intervallo di tempo, misurabile in milionesimi di secondo). Atlas e Cms hanno scelto di realizzare *calorimetri elettromagnetici* (per misure di energia di elettroni, positroni e fotoni) di grande precisione, per avere la possibilità di rivelare un eventuale Higgs “leggero” (con massa dell’ordine di un centinaio di volte quella del protone!) che decada in

due fotoni, ma hanno adottato tecniche diverse per la loro realizzazione. Atlas ha sviluppato un calorimetro elettromagnetico ad argon liquido e piombo di nuova concezione, con una geometria a “fisarmonica” che consente una buona uniformità e risoluzione spaziale. Esso individua, cioè, con buona precisione il punto di impatto del fotone o dell’elettrone sul calorimetro. Cms, invece, ha adottato un calorimetro elettromagnetico a cristalli di tungstato di piombo ($PbWO_4$). I cristalli che lo compongono hanno prestazioni eccezionali in termini di risoluzione intrinseca, migliore di quella di Atlas. Le soluzioni adottate per la misura di energia delle particelle sensibili alle interazioni forti, come protoni e pioni, nel settore centrale (la cosiddetta *calorimetria adronica*) sono invece simili per Atlas e Cms. La scelta è caduta per entrambi gli esperimenti su calorimetri a lastre di scintillatore, formate da un materiale plastico che emette luce se attraversato da particelle cariche e alternate ad assorbitori, che inducono la produzione a valanga delle particelle secondarie, tanto più abbondante quanto maggiore è l’energia della particella iniziale. Anche per il tracciatore interno sono state scelte soluzioni molto simili: strati sovrapposti di rivelatori al silicio, con una suddivisione estremamente elevata (80 milioni di celle solo per il rivelatore *a pixel* di Atlas), per

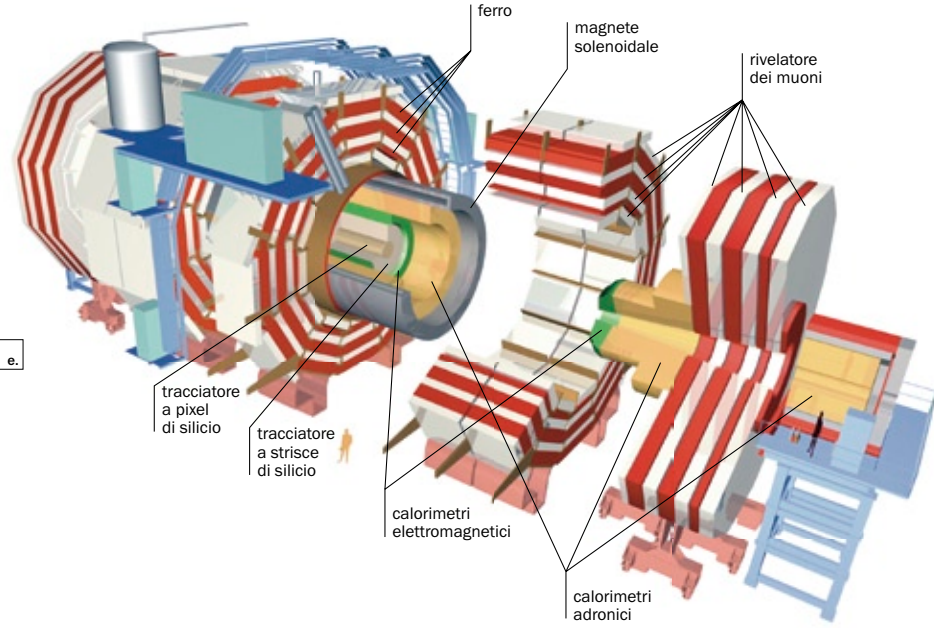


a. Una vista dall’alto del percorso sotterraneo del tunnel di Lhc nei pressi della città di Ginevra, in Svizzera. Il tunnel ha una circonferenza di 27 km. Nella foto è indicata l’ubicazione dei due esperimenti Atlas e Cms.



b. / c. Schema dell’esperimento Atlas (fig. b) e del campo magnetico di Atlas (fig. c). Atlas, con la sua lunghezza di 46 m, un’altezza di 25 m e una larghezza di 25 m (si confronti con la dimensione delle persone disegnate nello schema), è il più grande rivelatore mai costruito. Il suo peso ammonta a ben 7.000 tonnellate.

d. / e. Schema dell’esperimento Cms (fig. e) e del campo magnetico di Cms (fig. d). Cms (dimensioni: 21x15x15 m), pur essendo un rivelatore più piccolo di Atlas, pesa ben 12.500 tonnellate, quindi quasi il doppio. In particolare, il magnete solenoidale di Cms è il più grande mai costruito al mondo.





f.

f.
Installazione, nel gennaio del 2007, di una parte dell'apparato di Cms nella caverna che alloggia l'esperimento. Queste operazioni sono state molto delicate, dato che le dimensioni dei pezzi calati corrispondevano quasi esattamente a quelle del foro attraverso cui venivano posizionati nella caverna. La caverna di Cms si trova a 100 m di profondità.

permettere la misura di precisione dell'impulso delle particelle cariche e misurare i vertici secondari, ossia determinare dove avvengono i decadimenti delle particelle a vita media lunga (dell'ordine del millesimo di miliardesimo di secondo!), come lo sono ad esempio alcune particelle contenenti il quark b (b come *beauty*, uno dei sei tipi di quark). Il tracciatore interno di Atlas contiene inoltre un rivelatore a gas, il cosiddetto *Transition Radiation Tracker*, che ha la capacità di identificare gli elettroni mediante i raggi X, che solo essi generano in questo rivelatore. Il fatto che l'intensità del campo magnetico nel tracciatore interno sia maggiore in Cms che in Atlas, fornisce a Cms una precisione maggiore nella misura del momento della particella. Grazie dunque alle prestazioni di Lhc e degli apparati Atlas e Cms, siamo pronti a osservare l'Higgs qualunque sia la sua massa nell'intervallo in cui se ne sospetta l'esistenza. L'osservazione da parte di entrambi gli esperimenti di altri processi estremamente rari e difficili da individuare sarà un elemento di conferma importante delle scoperte che Lhc potrà offrire. Lhc e gli esperimenti Atlas e Cms possono fornire risposte a quesiti fondamentali sulle leggi e sui costituenti della natura ed esplorare una nuova frontiera di energia, alla ricerca di fenomeni inaspettati di Nuova Fisica.

Biografia

Maria Curatolo è ricercatrice presso i Laboratori Nazionali di Frascati dell'Infn. Attualmente è responsabile nazionale dell'esperimento Atlas, al quale ha partecipato fin dalle prime fasi di progettazione circa 15 anni fa. Ha contribuito alla progettazione e realizzazione dello spettrometro per muoni di Atlas.

Link sul web

<http://atlas.ch>

<http://cms.cern.ch>

<http://web.infn.it/cms>

www.youtube.com/cern



<
Vista aerea del Tevatron. L'anello lungo 6 km che costituisce l'acceleratore è sotterrato, ma sono ben visibili il "fiume" circolare che serve il sistema di raffreddamento e varie stazioni di servizio lungo il suo percorso, nonché l'edificio arancione che contiene il rivelatore Cdf.

La ricerca dell'Higgs oltre oceano

A Chicago la caccia è già iniziata, ma a energie minori.

di Franco Bedeschi

Fino all'avvento di Lhc il Tevatron, situato presso il laboratorio Fermilab vicino a Chicago, è stato per più di vent'anni la macchina acceleratrice con la più alta energia di collisione dei fasci al mondo. L'associato programma di fisica sviluppato dagli esperimenti Cdf e DZero è stato ed è tuttora uno dei maggiori successi scientifici nell'ambito della fisica delle particelle elementari. La ricerca del bosone di Higgs non poteva quindi mancare nella lista delle più importanti attività perseguite da questi esperimenti. Il Tevatron è stata la prima macchina acceleratrice di grosse dimensioni realizzata interamente con magneti superconduttori. Questi sfruttano il principio secondo cui la resistenza elettrica di certi metalli si riduce

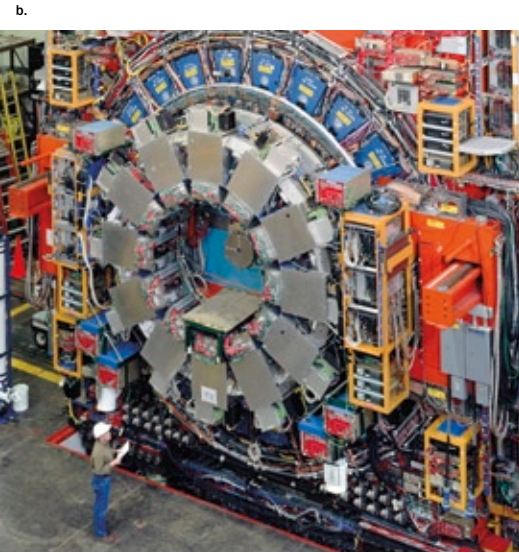
quasi a zero quando sono raffreddati a temperature di circa 270 gradi sotto zero. Ciò permette di raggiungere campi magnetici molto più elevati di quelli ottenibili con magneti convenzionali e un minore dispendio di energia. Il successo ottenuto con la sua realizzazione ha costituito un importante passo avanti nella tecnologia delle macchine acceleratrici. Questa tecnologia di base è stata successivamente utilizzata su scala ancora più grande per Lhc. L'esperimento Cdf è stato progettato e costruito nella prima metà degli anni ottanta da una collaborazione di istituzioni americane, giapponesi e italiane. Il contributo dell'Italia al progetto è stato molto significativo: grosse parti del rivelatore sono state costruite in Italia o con un sostanziale contributo italiano. Negli anni seguenti i fisici italiani hanno proposto e costruito miglioramenti del rivelatore di concezione fortemente innovativa, inoltre hanno dato un grosso contributo alla gestione dell'esperimento e alla realizzazione di importanti misure di fisica partendo dalla massiccia quantità dei dati raccolti. Per ogni collisione tra i fasci, la probabilità che si formi un bosone di Higgs è estremamente piccola: servono quindi una grande quantità di collisioni per potere produrre un numero sufficiente di Higgs da permetterne l'osservazione. Nel corso della prima campagna di presa dati, che si è conclusa nel 1996, Cdf non aveva nessuna seria prospettiva di osservare la produzione diretta di bosoni di Higgs, perché l'intensità dei fasci era ancora troppo bassa.

Ciononostante i risultati conseguiti sono stati in grado di darci delle informazioni indirette su questo bosone estremamente sfuggente. I modelli teorici infatti legano strettamente tra di loro la massa di tre fondamentali particelle elementari: il bosone W, il quark top e il bosone di Higgs. Quindi misurando con precisione le prime due è possibile stimare quella dell'Higgs. Nel 1994 mentre il bosone W era già ben misurato, del quark top, l'ultimo della famiglia dei quark, ancora non c'era nessuna traccia, nonostante una caccia serrata che era iniziata già dagli anni settanta e aveva impegnato scienziati di tutto il mondo. Finalmente, in quell'anno, Cdf osservò per la prima volta un'evidenza sperimentale di quark top, con produzione simultanea della coppia top e anti-top, poi confermata da DZero e successivamente, con un più grande campione di dati, da entrambi gli esperimenti. Il valore della massa del quark top misurato al Tevatron era compatibile con i risultati indiretti ottenuti al Lep del Cern, confermando così la validità dell'impianto teorico. Il valore osservato portò a un'altra importantissima conclusione: il bosone di Higgs doveva essere leggero, quindi forse alla portata degli esperimenti al Tevatron! Ma servivano fasci più intensi. Da tempo il Fermilab aveva iniziato un programma per aumentare l'intensità dei fasci del Tevatron. Dopo una lunga sosta per completare tutte le modifiche apportate sia all'acceleratore che agli apparati sperimentali, si ricominciò a prendere dati intorno alla metà del

a.
Vista dei magneti superconduttori nel tunnel del Tevatron. Il grosso tubo subito sopra porta l'elio liquido che serve per il loro raffreddamento fino a 270 gradi sotto zero.



2001. L'anno prima, i risultati dell'acceleratore Lep al Cern avevano incendiato il dibattito scientifico con una debole indicazione di un possibile avvistamento dell'Higgs a una massa di circa 114 GeV/c². Purtroppo il definitivo spegnimento del Lep non permise di verificare questo segnale, che era in una zona potenzialmente accessibile dagli esperimenti al Tevatron. Nello stesso periodo gruppi di scienziati lavorarono intensamente per valutare le possibilità di scoperta dell'Higgs al Fermilab con il nuovo Tevatron potenziato e gli apparati sperimentali molto migliorati. La conclusione fu che esisteva un ambito di possibili masse dell'Higgs dove gli esperimenti Cdf e DZero potevano osservarlo o escluderne l'esistenza. Era però necessario che sia l'acceleratore che gli esperimenti funzionassero al massimo delle loro possibilità. Questo diede a tutti uno stimolo enorme, ma solo nell'agosto 2008 e dopo uno sforzo colossale, con un campione di dati ancora circa 5 volte più piccolo di quanto ci si attende per la fine della presa dati, si è riusciti per la prima volta a escludere l'esistenza dell'Higgs in una piccola zona di massa intorno a 170 GeV/c², poi estesa già nell'inverno del 2009. Quasi in contemporanea, viene per la prima volta osservata la produzione di un quark top singolo, un raro processo previsto dal Modello Standard e con difficoltà sperimentali molto simili a quelle della rivelazione del bosone di Higgs. Sono dei risultati importanti perché fanno capire che, comunque sia, Cdf lascerà il suo segno nella



storia della ricerca dell'Higgs. Servirà ancora un po' di tempo prima che sia l'acceleratore che gli esperimenti di Lhc diventino completamente operativi. Nel frattempo gli esperimenti al Tevatron continueranno ad accumulare dati e a migliorare le tecniche di analisi sperando di osservare una qualche evidenza del bosone di Higgs prima di Lhc. È possibile che ciò avvenga e sarebbe il meritato coronamento del lavoro svolto al Fermilab. Comunque vada però solo una macchina con energia e intensità enormemente superiori al Tevatron, come Lhc, potrà produrre un numero sufficiente di Higgs da poter studiare nel dettaglio necessario per capire se abbiamo veramente a che fare con il responsabile della generazione della massa di tutte le altre particelle. Tutta la comunità scientifica mondiale attende con ansia quel momento.

b.
Il rivelatore Cdf subito prima di essere posto nel punto di collisione dei fasci di particelle, nel gennaio 2001.

Biografia
Franco Bedeschi è ricercatore presso la sezione Infn di Pisa. Ha svolto attività di ricerca al Cern e al Fermilab. Collabora dal 1980 all'esperimento Cdf di cui è stato responsabile dal 1998 al 2002.

Link sul web
www.fnal.gov
www-cdf.fnal.gov
www-d0.fnal.gov

[as] benvenuti a bordo

Intervista a Gianluca Cerminara, *post-doc* al Cern.

di Catia Peduto



Come è la vita di un fisico che cerca il bosone di Higgs al Cern? Lo abbiamo chiesto a Gianluca Cerminara, un giovane trentenne che lavora nell'esperimento Cms (vd. "I giganti a caccia", p. 24). La sua esperienza al Cern è incominciata nell'estate del 2002, mentre scriveva la sua tesi di laurea. Dopo la laurea ha vinto un dottorato in Cms e poi un post-doc, durante il quale ha anche avuto l'opportunità di recarsi per un anno negli Stati Uniti, al Fermilab.

[as] Gianluca, come è la vita a Ginevra? Rispetto a Torino, dove sono nato, Ginevra è una città molto più piccola e offre di meno, ma quello che mi piace tantissimo è che ci sia la montagna: vado a sciare, faccio alpinismo, arrampicate ed è molto bello. In realtà, io non abito proprio a Ginevra, ma in Francia, in un paesino al confine, come molti dei ricercatori del Cern, perché è più comodo.

[as] Quindi assapori le tradizioni di entrambi i paesi? In questo senso lavorare al Cern è ancora più interessante: ci sono ricercatori un po' da tutto il mondo! Questa aria di internazionalità la si respira soprattutto nella mensa...

[as] Dal 2002 lavori in Cms, uno dei due esperimenti più grandi di Lhc. Raccontaci di cosa ti sei occupato in tutti questi anni. Principalmente ho sviluppato dei software per la ricostruzione degli eventi e controllato che funzionino le camere del sistema per muoni (le *drift tube chambers*). Ho anche partecipato alla loro costruzione e alle verifiche di funzionamento. Alcuni di questi rivelatori di Cms, infatti, sono stati prodotti all'Infn di Torino, dove mi sono laureato. Dopo le prove in laboratorio abbiamo portato i rivelatori al Cern, dove li abbiamo installati e controllati settore per settore.

[as] Come si svolge la tua giornata tipo al Cern? Dato che sviluppo software legati al rivelatore, spesso sono in ufficio davanti al computer o nella sala di controllo di Cms, dove partecipo alla presa dei dati. L'anno prossimo, quando finalmente l'esperimento partirà a pieno regime, spero che il mio lavoro diventerà ancora più divertente: parteciperò anche all'analisi dei dati, che ho imparato a fare al Fermilab un paio di anni fa. L'atmosfera di un esperimento in presa dati, infatti, cambia completamente ed è la ricompensa per il lavoro di preparazione durato così tanti anni!

[as] Come è stata questa esperienza al Fermilab? Ho lavorato nell'esperimento DZero, uno degli esperimenti del Tevatron (vd. "La ricerca dell'Higgs oltre oceano", p. 29). È praticamente l'equivalente di Cms, ma lavora a energie più basse. DZero sta già cercando il bosone di Higgs da vari anni. Io in realtà non cercavo direttamente il bosone di Higgs, ma studiavo un aspetto particolare, il cosiddetto "fondo" che dovrà essere analizzato anche in Lhc per riuscire a individuare l'Higgs (vd. "L'assedio all'Higgs", p. 18).

[as] Quindi si può dire a pieno titolo che su vari fronti hai contribuito a questa impresa mondiale della ricerca del bosone di Higgs. Speri che lo si trovi o che, piuttosto, si abbiano evidenze di una Nuova Fisica inattesa? Bè, sicuramente trovare Nuova Fisica sarebbe molto affascinante. A me personalmente il meccanismo di Higgs piace molto, quindi spererei piuttosto che si trovi il bosone di Higgs e *anche* qualche evidenza per una Nuova Fisica... Trovare aspetti nuovi è sempre uno stimolo importante per un ricercatore in fisica delle particelle!

Lhc: tutto all'estremo

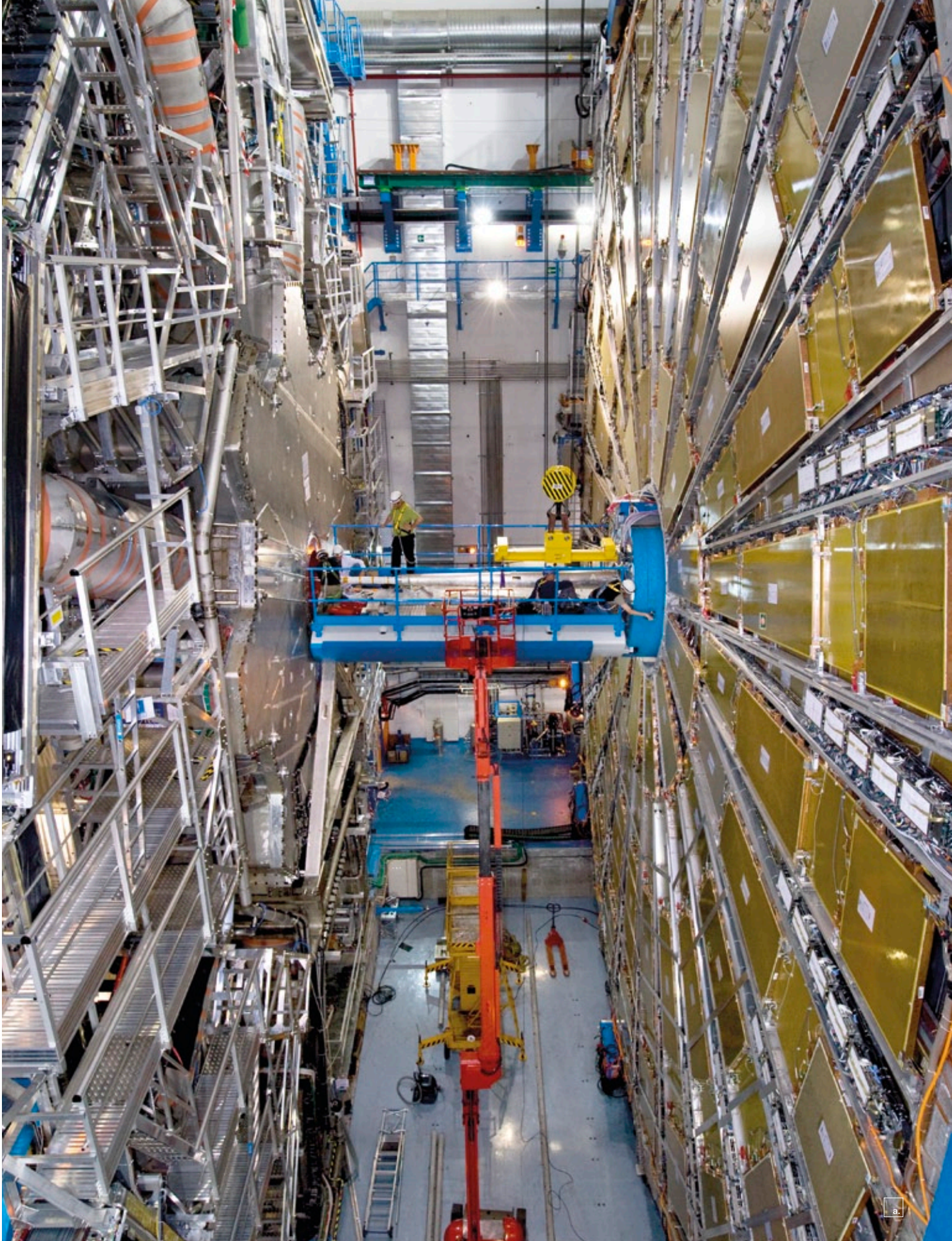
Come la più numerosa comunità di fisici realizza la più grande impresa scientifica della storia.

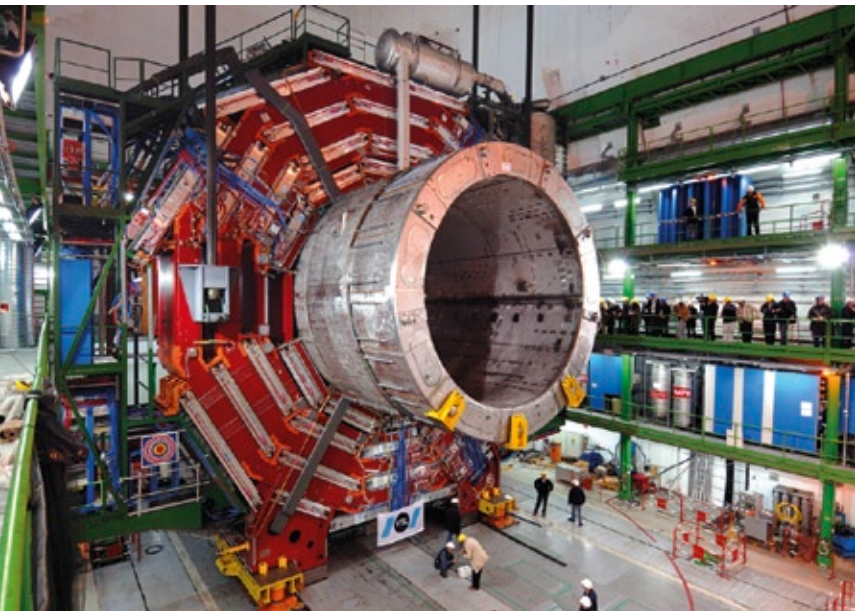
di Umberto Dosselli

L'avventura è iniziata. E con che numeri. Qualsiasi “addetto ai lavori” abbia provato a descrivere l'avventura di Lhc a un occasionale ascoltatore, in un'intervista, in un dibattito o semplicemente a un amico o parente che imprudentemente ci aveva chiesto: “Ma che cos'è questo Lhc di cui tanto si parla?”, non avrà potuto (o voluto) fare a meno di ricorrere a iperboli roboanti e paragoni ad effetto. In effetti, da qualunque lato lo si giri, sia l'acceleratore, che gli esperimenti che stanno iniziando la presa dati, presentano risvolti che non si sono mai visti nella sperimentazione scientifica. Anche alcuni aspetti che travalicano la parte più strettamente scientifica dell'impresa, ma che cercheremo ugualmente di mettere in evidenza. Innanzitutto Lhc stesso: il primo limite che si incontra è l'energia, in quanto a Lhc si accelereranno protoni a un'energia record di 7.000 miliardi di elettronvolt, o 7 TeV (il record attualmente è detenuto dal Tevatron del Fermilab di Chicago, dove ciascuno dei due fasci ha un'energia di circa 1 TeV); questo aumento di 7 volte dell'energia disponibile nelle collisioni porta la sperimentazione a Lhc in una regione (la cosiddetta *Terascale*), che molti indizi indiretti già ci dicono essere densa di novità scientifiche fondamentali. Nonostante Lhc abbia una circonferenza di ben 27 km, per tenere “in carreggiata” protoni

dell'energia di 7 TeV (e che viaggiano quindi a una velocità pari al 99,9999991% di quella della luce!) sono necessari campi magnetici molto intensi (pari a 8,3 tesla, circa 200.000 volte il campo magnetico terrestre) che sono generati in magneti dipolari superconduttori; per poter arrivare alle intensità di corrente necessarie per generare i campi magnetici che servono a Lhc, si è dovuto però far ricorso a elio superfluido, raffreddato alla temperatura di 1,9 gradi kelvin (cioè circa -271 °C) come elemento refrigerante. Questa temperatura è addirittura inferiore a quella dello spazio interstellare, dove esiste la radiazione di fondo a 3 gradi kelvin, ultima traccia della fornace primordiale del Big Bang. Inoltre in Lhc tutti gli elementi della macchina sono raffreddati a questa temperatura e pertanto l'impianto criogenico del Cern è capace di fornire ben 32.000 litri di elio liquido ogni ora, garantendo all'acceleratore le circa 120 tonnellate di elio necessarie: se si pensa che l'elio è uno dei gas più leggeri, si ha un'idea del gigantesco frigorifero impiegato. Passando dall'acceleratore ai rivelatori, anche a uno sguardo veloce ci si accorge che ogni dettaglio è stato portato all'estremo: dalla taglia, alla complessità, alla bellezza tecnologica e alle caratteristiche. Quando, negli anni '80, si cominciò a parlare di Lhc e dei suoi esperimenti, le caratteristiche previste erano tali, che si

a.
Parte dei rivelatori a muoni dell'esperimento Atlas.





b.



c.

dubitava che si potessero costruire esperimenti “normali” alle condizioni estreme generate da fasci di protoni di altissima energia e intensità, che collidono ogni 25 miliardesimi di secondo. Da allora un paziente cammino di ricerca e sviluppo tecnologico sui rivelatori ha permesso di mettere in campo tracciatori al silicio per centinaia di metri quadrati, cristalli scintillanti resistenti alla radiazione, giganteschi rivelatori di muoni, capaci di risoluzioni spaziali, che pochi anni fa erano ancora esclusivo appannaggio di piccoli rivelatori molto specializzati. Un aspetto tecnologico non sufficientemente messo in rilievo nella descrizione dell'avventura scientifica di Lhc riguarda gli aspetti del calcolo, sia per quanto riguarda l'acquisizione dei dati che per la successiva analisi. A pieno regime Lhc fornirà infatti miliardi di eventi al secondo, ciascuno dei quali produrrà informazioni elettroniche, raccolte dai canali di lettura dei singoli rivelatori; questi diversi pezzi di informazione devono essere assemblati in tempo reale e filtrati, per lasciar passare solo quella parte ritenuta interessante e successivamente scritta su disco. Se si tiene conto che in questo processo si deve ridurre la quantità di informazioni di circa un milione di volte, senza possibilmente perdere quei pochi, preziosissimi eventi che possono evidenziare, per esempio, la produzione di un bosone di Higgs (si stima che siano un evento ogni

diecimila miliardi, molto peggio che un ago in un pagliaio!), si capisce l'importanza di questa parte dell'esperimento. Tutto questo è messo in pratica da potentissime reti locali di trasmissione dati, all'avanguardia tecnologica, che passano le informazioni a batterie di potenti server di ultima generazione. L'analisi dell'imponente mole di dati immagazzinata richiederà un altrettanto imponente insieme di computer. Per organizzare questa ulteriore sfida tecnologica, la comunità dei fisici delle particelle da anni sta mettendo a punto la Grid, vera rivoluzione computazionale del nuovo secolo. Con la Grid si ripeterà sicuramente quello che è accaduto negli anni '90 con il web, il precursore di Internet: uno strumento nato per rispondere alle richieste degli esperimenti di fisica delle particelle (all'epoca quelli al Lep del Cern), che, esportato poi ad altre scienze e quindi alla società, ha modificato quest'ultima in modo irreversibile. Ma l'eccezionalità di Lhc è testimoniata anche da altri parametri, forse meno “scientifici”, ma sicuramente altrettanto impressionanti. Se infatti fino a pochi decenni fa la fase di preparazione di un esperimento durava al massimo qualche anno, la complessità degli esperimenti di Lhc ha esteso questo periodo a una ventina d'anni, durante i quali si sono svolte dapprima delle prove di fattibilità su prototipi, e poi si sono costruite le varie componenti nei laboratori del mondo intero (compresi quelli

b.
Rivelatore centrale dell'esperimento Cms dopo essere stata posizionata nella postazione finale.

c.
Dettaglio del rivelatore centrale dell'esperimento Cms con i particolari dei complessi cablaggi necessari alla connessione dei rivelatori dell'esperimento.

dell'Infn che hanno avuto una grande parte anche in questa fase). I lavori sono iniziati infatti quando, nel 1987, il *Long Range Planning Committee* del Cern, con a capo Carlo Rubbia, raccomandò Lhc quale futuro acceleratore al Cern dopo il Lep. Il lavoro iniziò subito in tutti i laboratori e istituti del mondo interessati a questa nuova sfida sperimentale, mettendo in luce un'altra delle particolarità di questi esperimenti: le due collaborazioni Atlas e Cms (le più grandi) sono infatti composte ciascuna da oltre 2.500 fisici e ingegneri, provenienti da oltre 160 istituti, letteralmente da tutto il mondo. Non si è mai vista sul pianeta una tale “torre di Babele” scientifica. Qui persone provenienti anche da paesi che hanno significative frizioni politiche lavorano fianco a fianco, con un continuo scambio di dati e informazioni, con il solo scopo di mettere il proprio esperimento in condizione di fare misure di eccezionale valore. Queste grandi collaborazioni internazionali pongono, forse per la prima volta nell'ambito della ricerca, dei problemi di ordine sociologico per gestire in modo corretto i vari livelli organizzativi di ogni esperimento, dall'altro sono dei formidabili *melting pot*, occasioni di “mescolamento”, dove i nostri migliori giovani sono messi in contatto con loro omologhi provenienti da altre esperienze

e culture, in un'osmosi continua di eccezionale valore per la nostra società. Infine, l'ultimo aspetto che vorrei citare è forse quello più importante: il ritorno scientifico. La messe di risultati attesi è infatti imponente e tale da assicurare che gli esperimenti di Lhc riscriveranno il nostro modo di vedere l'Universo: la scoperta del bosone di Higgs, la ricerca della supersimmetria (possibile chiave per una spiegazione in termini di particelle della materia oscura che permea l'Universo), la possibile scoperta di altre dimensioni e, soprattutto, la possibile scoperta di qualcosa di totalmente inaspettato, rendono l'attesa dei primi dati quasi insopportabile.

Biografia
Umberto Dosselli è vicepresidente dell'Infn e partecipa all'esperimento Cms di Lhc. È stato responsabile a diversi livelli di esperimenti di fisica delle alte energie al Cern di Ginevra e al laboratorio Desy di Amburgo.

Link sul web
<http://lhc.web.cern.ch/lhc>
www.interactions.org/LHC



d.

d.
Una (piccola) parte della collaborazione dell'esperimento Atlas.

Contro ogni resistenza.

di Pasquale Fabbricatore,

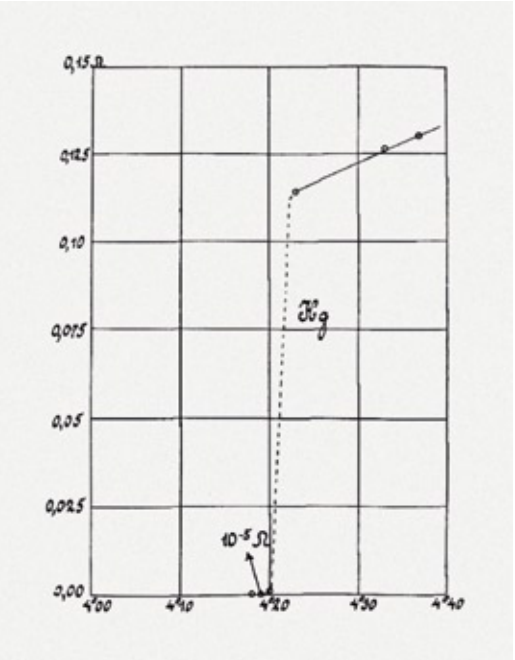
ricercatore
della sezione Infn di Genova



a.

a.
Fu il fisico olandese Kamerlingh Onnes a ottenere nel 1911 la prima prova sperimentale dell'aumento della conduttività di alcuni metalli in condizioni di temperatura vicine allo zero assoluto.

Nel 1908, il fisico olandese Kamerlingh Onnes realizzò un dispositivo per liquefare l'elio che, normalmente, a temperatura ambiente e pressione atmosferica, è allo stato gassoso. Dovendo raggiungere il punto di ebollizione dell'elio, che a pressione atmosferica si trova a 268,93 gradi centigradi sotto lo zero (4,22 gradi kelvin nella scala assoluta delle temperature), Onnes dovette riprodurre temperature tanto vicine allo zero assoluto da permettergli di effettuare anche esperimenti sulla resistenza elettrica dei metalli in queste condizioni estreme. Con grandissima sorpresa, nel 1911 scoprì che al di sotto di 4,15 gradi kelvin la resistenza elettrica del mercurio tendeva bruscamente ad annullarsi (nei limiti della sensibilità degli apparati di misura). Come resero evidente esperimenti successivi, altri elementi mostravano la proprietà di perdere la resistenza elettrica scendendo sotto un valore di temperatura T_c , detta *critica*. Il valore critico della temperatura non era lo stesso per tutti gli elementi chimici che presentavano questa proprietà, ma variava tra pochi centesimi di grado kelvin fino a un massimo di 9,2 gradi kelvin (nel caso del niobio). Questi materiali furono chiamati superconduttori. Tuttavia, i superconduttori non sono semplicemente dei conduttori perfetti e la resistenza elettrica non è l'unico parametro a caratterizzarne il comportamento: l'applicazione di un campo magnetico sufficientemente elevato o di una corrente elettrica sufficientemente



b.

intensa, infatti, distruggono le proprietà superconduttive. Queste risultano così essere confinate non solo al di sotto di una temperatura critica, ma anche al di sotto di un valore di campo magnetico critico H_c e di una densità di corrente critica J_c . Una caratteristica fondamentale dei superconduttori è legata al fatto che essi espellono completamente il flusso magnetico. Questo meccanismo fisico avviene attraverso la generazione di supercorrenti che scorrono sulla loro superficie e che sono in grado di schermare completamente il campo magnetico esterno; all'interno del materiale, quindi, il campo magnetico è uniformemente uguale a zero. Questa non è però l'unica tipologia di superconduttori esistenti. Un progresso notevole nella comprensione dei superconduttori avvenne in seguito alla scoperta dell'esistenza di una seconda categoria di superconduttori, detta del II tipo. Nei superconduttori di questa famiglia le correnti elettriche possono scorrere anche all'interno del materiale, che presenta così due campi magnetici critici: al di sotto del primo valore, più basso, il materiale espelle completamente il flusso magnetico; per valori di campo magnetico compresi tra il primo e il secondo campo critico, il flusso magnetico entra progressivamente con una struttura a vortici fino a distruggere le proprietà superconduttive. Materiali con campi critici elevati sono per lo più leghe (come il NbTi, niobio titanio) o composti intermetallici (Nb_3Sn , niobio-3-stagno). Questi

b.
La misura originale di Kamerlingh Onnes, con la resistenza elettrica del mercurio che scende bruscamente e assume un valore nullo a una temperatura detta critica compresa tra 4,10 gradi kelvin e 4,20 gradi kelvin.

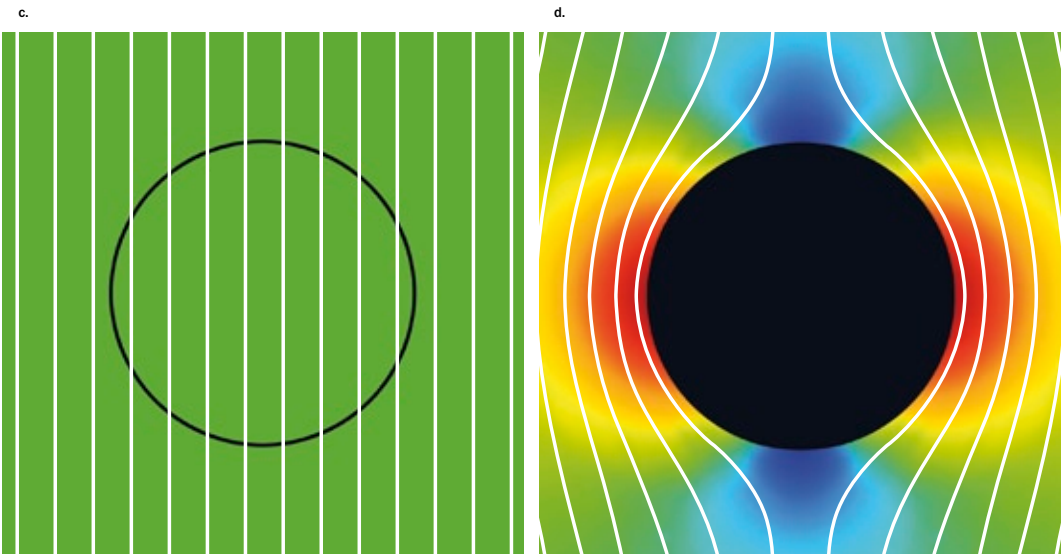
materiali, se opportunamente trattati, possono condurre correnti elevatissime, fino a diverse migliaia di ampère per millimetro quadrato, e sono quelli utilizzati nelle applicazioni tecnologiche che richiedono la conduzione di elevate correnti senza dispersione di energia. È interessante notare che il fenomeno della superconduttività è rimasto per molto tempo non compreso nei suoi meccanismi fondamentali. Seppure fossero già state sviluppate molte teorie fenomenologiche, solo nel 1957 venne formulata una teoria microscopica per descrivere la superconduttività, la teoria BCS, dai fisici che la elaborarono, Bardeen, Cooper e Schrieffer e che per questo ottennero il Nobel (vd. “La particella che dà la massa”, p. 4).

La bassa temperatura critica dei materiali superconduttori è stata un limite allo sviluppo delle applicazioni tecnologiche, e lo è tuttora, in quanto richiede che i dispositivi siano raffreddati attraverso il contatto con fluidi criogenici, come l’elio liquido, complessi da gestire e ad alti costi. Dal 1986, la tecnologia dispone di una nuova generazione di superconduttori, gli ossidi ceramici, caratterizzati da temperature critiche e campi magnetici critici molto più elevati e quindi più semplici da gestire. Tuttavia, questi nuovi superconduttori, detti ad alta T_c , hanno strutture complesse e il meccanismo della loro superconduttività non è lo stesso dei superconduttori tradizionali. Inoltre, sono materiali fragili: i cavi, quindi, sono di difficile realizzazione. Al momento i risultati migliori in termini di trasporto di corrente si ottengono su

nastri di YBCO (ittrio bario ossido di rame, con $T_c = 92$ kelvin, pari a -181 °C), che però necessitano di ulteriori sviluppi prima di poter essere applicati su larga scala.

L’applicazione della superconduttività ha avuto un grande successo in medicina, con la risonanza magnetica medica (MRI, acronimo inglese per Risonanza Magnetica per Immagini) e nel campo della ricerca, con le applicazioni agli acceleratori o alle tecnologie per la fusione nucleare. Si è stimato che nel 2007 è stato investito in strumentazione per la risonanza magnetica circa l’80% del mercato globale della superconduttività, che ammonta a circa 4 miliardi di euro, mentre il 16% è stato destinato alle applicazioni nella ricerca scientifica.

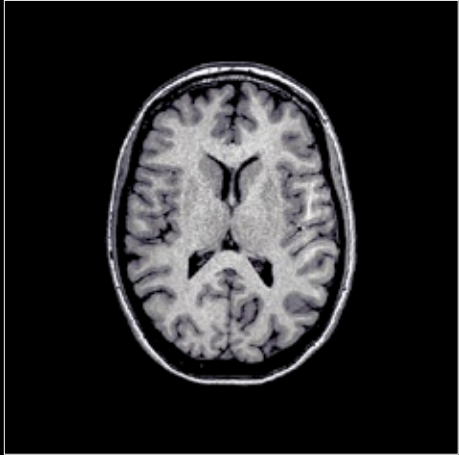
L’industria italiana dei cavi, dei magneti e della criogenia è da anni in prima fila in questo scenario di tecnologia avanzata, grazie a una forte sinergia tra industria, centri di ricerca e università. Un importante e recente risultato è il magnete dell’esperimento Cms del Large Hadron Collider del Cern, il cui cuore è un solenoide superconduttore di grandi dimensioni. Suddiviso in 5 moduli, il solenoide è stato costruito presso l’ASG Superconductors di Genova (già Ansaldo Superconduttori) dopo un lungo processo di sviluppo in ambito progettuale, presso la sezione di Genova dell’Infn, e in ambito dei processi industriali, in ASG: solo il continuo interscambio tra queste due realtà ha permesso la realizzazione del cuore di Cms, ora attivo nella sala 5 di Lhc, che ospita l’esperimento (vd. “I giganti a caccia”, p. 24).



c. / d.
Un oggetto cilindrico superconduttore immerso in un campo magnetico. Al di sopra della temperatura critica (fig. c), il flusso magnetico penetra il materiale. Al di sotto (fig. d) il flusso viene espulso e quindi all'interno del materiale il campo magnetico è uniformemente uguale a zero (zone in blu nella figura). Questo è possibile perché sulla superficie circolano supercorrenti che schermano il campo magnetico esterno e alterano il campo magnetico immediatamente al di fuori del cilindro fino a raddoppiarne il valore (zone in rosso).



1. 2. 3.



1. / 2.
I tomografi MRI si presentano con due possibili configurazioni: in una il campo magnetico è generato da un solenoide (fig. 1), nella seconda è prodotto da due solenoidi contrapposti (fig. 2); questi ultimi sono detti sistemi aperti in quanto permettono di mantenere il contatto visivo con il paziente durante l'esame.

3.
Immagine assiale dell'encefalo: si distingue con chiarezza il diverso segnale della corteccia cerebrale, composta da materia grigia, e della sostanza bianca sottostante. Al centro i ventricoli contenenti fluido cerebrospinale.

[as] box

Salutari risonanze

È interessante osservare come alcuni tra i concetti più sorprendenti della fisica moderna siano di casa negli ospedali: l'antimateria, cara ai lettori di fantascienza, è alla base delle immagini Pet (*Positron Emission Tomography*; vd. *Asimmetrie* n. 7) preziose tanto in neuroscienze che in oncologia; la superconduttività, d'altra parte, ci permette di ottenere immagini di risonanza magnetica nucleare (*Magnetic Resonance Imaging*, MRI). Tali immagini sono in realtà mappe dell'idrogeno nel corpo: presenti nelle molecole di acqua e nel tessuto adiposo del corpo umano, i nuclei di idrogeno hanno difatti proprietà magnetiche, un po' come minuscoli aghi di bussola, e possono essere studiati utilizzando onde radio a condizione di trovarsi in campi magnetici intensi e di applicare la radiofrequenza opportuna, detta appunto *frequenza di risonanza*. Fortunatamente alcune proprietà del

segnale di risonanza magnetica nucleare dipendono dall'ambiente chimico in cui le molecole si trovano, ad esempio il segnale dell'acqua della materia grigia è diverso da quello delle materia bianca, e ciò rende le immagini ricche di informazioni.

Gli elementi fondamentali di un sistema per la risonanza magnetica per immagini sono quindi un magnete e un sistema di antenne per emettere e ricevere onde radio. Lo strumento è nella maggior parte dei casi un solenoide, un sistema di avvolgimenti di cavo superconduttore in configurazione a ciambella, nel cui foro si accomodano i pazienti. Per i bambini e per le persone che soffrono di claustrofobia, tuttavia, sono disponibili sistemi "aperti" basati su due sistemi magnetici cilindrici contrapposti.

Il magnete superconduttore genera un campo magnetico di intensità tra i 0,5 e i 3 tesla: se messo

a confronto con i 0,05 millesimi di tesla del campo magnetico terrestre, un tomografo per risonanza magnetica da 1,5 tesla – il più usato – sottopone il paziente a un campo magnetico 30.000 volte più intenso di quello in cui viviamo.

La risonanza magnetica per immagini è così diffusa perché permette di visualizzare con grande dettaglio le strutture anatomiche. Non utilizzando radiazioni ionizzanti, inoltre, permette l'acquisizione di numerose immagini senza alcun rischio per il soggetto. Questo ha aperto le porte a studi funzionali sugli organi in movimento, come nel caso del cuore, o mentre essi svolgono le loro funzioni, come nel caso del cervello durante l'esecuzione di un compito cognitivo o motorio.

[Renata Longo, *Università e sezione Infn di Trieste*]

Magneti dal superfreddo

La macchina che spinge al limite le tecnologie.

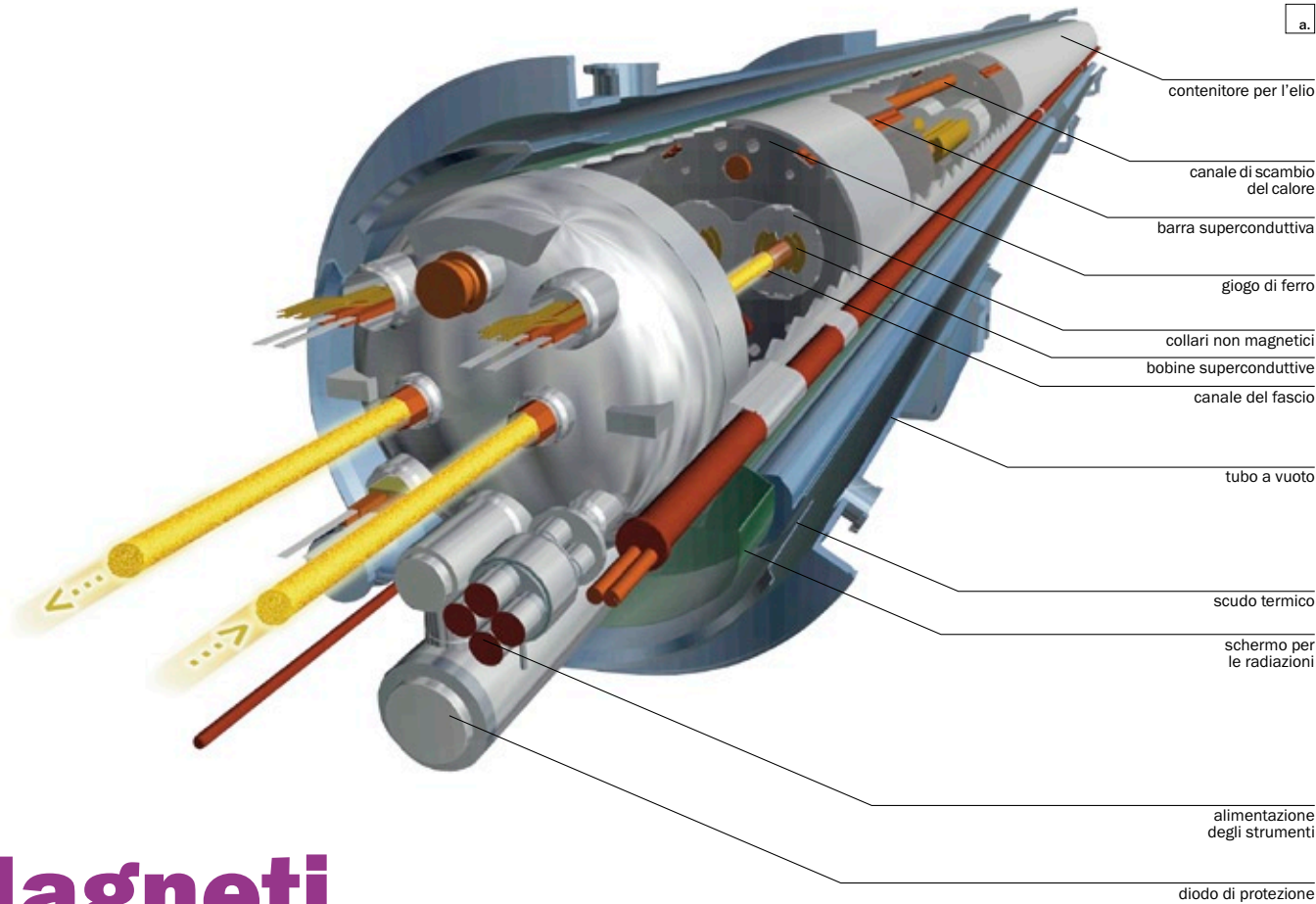
di Lucio Rossi

Nella corsa a “vedere” dettagli sempre più fini della materia, il Large Hadron Collider è oggi la macchina più veloce: il limite tecnologico estremo raggiunto dalla comunità scientifica fino a oggi. Lhc si comporta come un potentissimo microscopio in grado di evidenziare dettagli dell'ordine della lunghezza d'onda associata alle particelle accelerate: per energie dell'ordine del teraelettronvolt (TeV), come quelle raggiunte in Lhc, la lunghezza d'onda delle particelle accelerate è pari a un milionesimo di nanometro (10^{-18} m), un attometro. Lhc è dunque, più che un microscopio, il primo “attoscopio” mai realizzato. Da un punto di vista complementare Lhc può essere visto come una macchina del tempo, poiché le condizioni che si possono creare al

suo interno nelle collisioni tra le particelle, erano presenti solo negli istanti iniziali dopo il Big Bang. Anche in questo caso la capacità di spingersi indietro nel tempo dipende dall'energia delle particelle e per energie di 1 TeV, ad esempio, porta a esplorare scale temporali di circa 1 picosecondo (10^{-12} secondi) dopo il Big Bang. L'energia, quindi, è il parametro primario e in un acceleratore circolare come Lhc essa dipende dal raggio dell'anello e dal campo magnetico prodotto per mantenere le particelle lungo la traiettoria circolare. Per ottenere campi magnetici sufficientemente elevati si è reso necessario l'uso di materiali e tecnologie sofisticate per la conduzione efficace della corrente elettrica. L'utilizzo della superconduttività, in particolare, ha permesso di raggiungere energie elevatissime con impianti giganteschi ma possibili: Lhc ha una circonferenza di 27 km e una potenza di 50 megawatt, ma se fosse realizzato con tecnologie classiche richiederebbe un tunnel di 90-100 km e 1.000 megawatt di potenza per funzionare! I magneti di Lhc hanno la caratteristica di essere raffreddati con elio superfluido alla temperatura di 1,9 kelvin (- 271,1 °C); ogni magnete, quindi, è ermeticamente chiuso per contenere il prezioso fluido. Il cuore di un magnete superconduttore è costituito dai cavi superconduttori, avvolti in bobine, che al passaggio della corrente elettrica generano il campo magnetico. Una coppia di bobine (dipolo superconduttivo) fornisce il campo

magnetico necessario a piegare i fasci per costringerli su una traiettoria circolare. Lhc è dotato di 1.232 magneti di dipolo che, con i loro 15 m e più di lunghezza, occupano oltre i due terzi del tunnel e determinano l'energia di tutta la macchina. Producono in media un campo magnetico di 8,3 tesla, circa 200.000 volte più intenso del campo magnetico terrestre, e un campo massimo teorico stimato intorno a 9,7 tesla (questo margine è necessario per operare in condizioni stabili). Per assicurarne la stabilità meccanica, i cavi superconduttori sono alloggiati in una cavità a forma di arco romano ritagliata su misura con grande precisione e la loro posizione deve essere controllata con un'accuratezza di 30 micron sull'intera lunghezza. Questo parametro è stato tenuto sotto controllo nel corso di tutta la costruzione con sofisticate misure magnetiche integrate nel ciclo di fabbricazione; oltre a verificare la geometria di costruzione, tali misure hanno permesso di identificare i difetti di costruzione inosservati durante i diversi passi di controllo qualità o invisibili con misure meccaniche o elettriche. La cavità che alloggia le bobine è formata dai *collari*, laminazioni di un particolare acciaio inox di grande qualità, detto *austenitico*, tale da non diventare magnetico neanche a basse temperature. Oltre ad assicurare la precisione voluta, i collari devono sostenere gli sforzi elettromagnetici. Il campo magnetico, infatti, genera una pressione di circa 400

- a. Disegno del magnete dipolo di 15 m di Lhc, inserito nel criostato per elio superfluido.
- b. Spostamento a distanza di un magnete (*cold mass*), prima dell'inserimento nel criostato al Cern.
- c. Le bobine superconduttive dei dipoli di Lhc in fase di produzione presso Ansaldo Superconduttori Genova (ASG- Gruppo Malacalza).





d.

atmosfera, corrispondente a una forza di circa 4 meganewton (pari al peso di un corpo di 400 tonnellate) per ogni metro di lunghezza: una forza simile potrebbe anche indurre le bobine ad aprirsi. Anche il più piccolo movimento, tuttavia, deve essere impedito per evitare ogni causa di dissipazione di energia. Alle temperature di operazione di 1,9 gradi kelvin, infatti, è sufficiente un millijoule di energia rilasciata (l'energia acquisita da una massa di un grammo dopo una caduta libera di dieci centimetri) per fare *transire* il cavo superconduttore, facendogli perdere le peculiari caratteristiche e portandolo a dissipare per effetto Ohm come un qualsiasi conduttore. Questo fenomeno di improvviso ritorno dallo stato superconduttore allo stato normale viene chiamato *quench*. Il design del magnete è fatto in modo da evitare il quench incrementando la stabilità del cavo. Nonostante i diversi accorgimenti, tuttavia, il quench non è raro nei magneti di tipo dipolare. Essi devono essere così protetti da pericolosi eccessi di tensione elettrica e danneggiamenti meccanici dovuti alle variazioni brusche e non omogenee di temperatura. Il quench deve essere individuato nel tempo massimo di 0,01 secondi e il segnale, di pochi millivolt, deve essere distinto dal rumore elettrico di fondo. Una volta scoperto il quench, è necessario azionare i riscaldatori inseriti nelle bobine e scaricare l'energia, ossia la corrente, del magnete. Un ritardo anche di soli 0,1 secondi può essere fatale per il magnete.

Quasi tutti i grandi magneti sono stati costruiti dall'industria europea: il Cern ha fornito i principali componenti e il prezioso cavo superconduttore, fino ai collari e il giogo in ferro dolce. Lo sforzo logistico per la loro collocazione è stato impressionante: complessivamente, sono state consegnate, ispezionate e collaudate circa 150.000 tonnellate di materiale ad alta tecnologia. Questo materiale ha quindi viaggiato per l'Europa impegnando in media dieci grandi trasporti al giorno per cinque anni. Dopo essere stati consegnati al Cern, i magneti sono stati inseriti nel loro alloggiamento criogenico e collaudati singolarmente in condizioni operative (a 1,9 gradi kelvin di temperatura e 8,3 tesla di campo magnetico). Per stabilire la qualità del campo magnetico, inoltre, sono state condotte misure magnetiche in condizioni operative su circa il 10% dei magneti. Tutti i magneti sono stati quindi installati nella macchina e interconnessi per formare gli otto settori, lunghi 3,3 km ciascuno, che formano Lhc. Il collaudo della macchina, incluso il test d'iniezione e circolazione dei fasci di protoni, avvenuto con esito positivo il 10 settembre scorso, sembrava coronare un successo che ha percorso tutto il 2008. Tuttavia, proprio al termine della prima fase del collaudo, a un'energia di 5 TeV, un difetto elettrico in una interconnessione ha causato un grave incidente. La connessione era caratterizzata da una resistenza di quattrocento volte superiore

d. Produzione dei dipoli magnetici in industria: fase di chiusura del recipiente a elio nella stazione di saldatura dei dipoli. La saldatura è completamente automatica: è effettuata sotto pressa (struttura blu) e guidata da tecnici saldatori (a sinistra, ai loro computer) tramite software di gestione.

a quella prevista. In queste condizioni, la dissipazione di energia a circa 8.700 ampère di corrente è diventata insostenibile per il sistema di raffreddamento e una deriva termica molto rapida ha causato la fusione della connessione stessa, con la conseguente generazione di un *arco elettrico*, una scarica elettrica persistente. La potenza dell'arco, mantenuto dall'enorme energia magnetica immagazzinata nella catena di magneti, pari a 600 megajoule, ha fuso la camicia di acciaio che racchiudeva la connessione e che conteneva l'elio superfluido: l'elio si è così riversato in grande quantità nel criostato, all'interno del quale è vaporizzato in breve tempo causando un rapido aumento di pressione, ben oltre i valori controllabili previsti in fase di progetto. Nonostante ogni dipolo abbia una massa di 30 tonnellate, la crescita incontrollata di pressione ha causato lo spostamento di numerosi magneti, provocando un danno meccanico di notevole entità. L'incidente mostra la complessità tecnologica della macchina e le difficoltà che si incontrano nel tentativo di prevedere ogni possibile inconveniente. Ha costretto a rivedere criticamente due aspetti della macchina: l'uno è il sistema di protezione elettrico, la cui sensibilità sarà migliorata di circa 1.000 volte in modo da rivelare i precursori di guasti e quindi evitarli; il secondo è il meccanismo di scarico dell'elio dal criostato. Non solo il numero delle valvole di scarico dovrà essere aumentato di molto,



e.

ma dovrà essere drasticamente aumentata la capacità di sfogo verso di esse per evitare ogni sovrappressione. Lhc è ora in corso di riparazione: i circa 60 magneti coinvolti devono essere riparati o controllati nuovamente. Inoltre, le modifiche dei sistemi di sicurezza devono essere applicate lungo tutta la macchina. Conseguentemente i tempi di riparazione sono valutati in diversi mesi e la messa in servizio è prevista ora per l'autunno 2009.

e. Operazioni nel tunnel di Lhc: chiusura con saldatura delle interconnessioni tra due dipoli (cilindro blu). A sinistra è visibile la linea di distribuzione criogenica (cilindri bianchi) che corre lungo i 27 km a fianco dai magneti.

Biografia

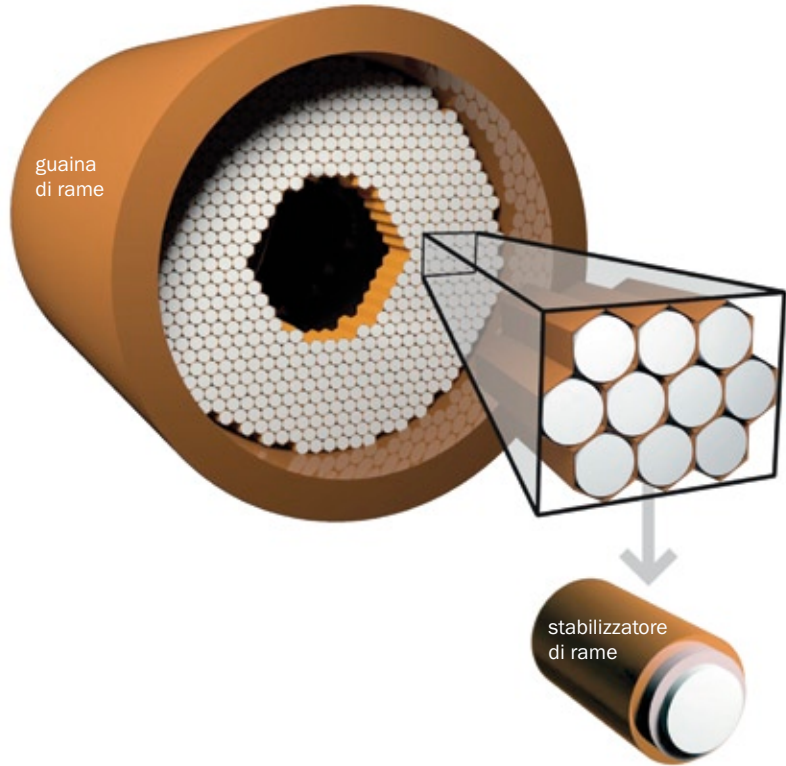
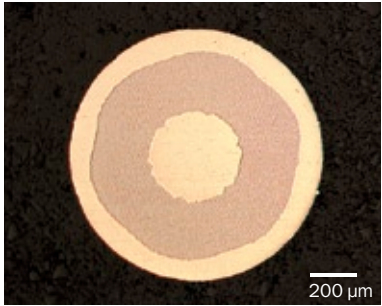
Lucio Rossi è professore in congedo all'Università di Milano e dal 2001 è responsabile al Cern del gruppo in carica dei superconduttori e dei magneti per Lhc. È stato responsabile dei primi dipoli superconduttori (collaborazione Cern-Infn), del superconduttore e delle bobine del toroide per l'esperimento Atlas.

Link sul web

<http://public.web.cern.ch/public/en/Research/Accelerator-en.html>

<http://public.web.cern.ch/public/en/LHC/HowLHC-en.html>

<http://microcosm.web.cern.ch/microcosm/LHCGame/LHCGame.html>



[as] box

Cavi superconduttori

L'elemento base della superconduttività in Lhc è la lega di niobio e titanio (Nb-Ti). Il niobio, estratto quasi esclusivamente in Brasile, è essenziale per il tipo di superconduttività che si manifesta alla temperatura critica di 9 gradi kelvin (-264 °C). Ha però bisogno del titanio per formare una lega caratterizzata da un campo magnetico critico elevato (13 tesla) e correnti critiche a loro volta molto elevate (oltre 1.000 ampère per mm²). Partendo dagli elementi base, con un processo di fusione sotto vuoto, sono prodotti lingotti di Nb-Ti molto puri e di grande omogeneità: la concentrazione relativa dei due elementi può variare localmente al massimo dell'1%, per evitare un degrado delle proprietà superconduttive. Partendo dagli elementi base, con un processo di fusione sotto vuoto, sono prodotti lingotti di Nb-Ti molto puri e di grande omogeneità: la concentrazione relativa dei due elementi può variare localmente al massimo dell'1%, per evitare un degrado delle proprietà superconduttive. Le barre ottenute, quindi, sono poi trafilate a freddo (T < 100 °C) fino a ottenere dei fili di diametro dell'ordine di 1 mm e lunghezza di 10-20 km. In questo modo i lingotti originari di Nb-Ti sono trasformati in filamenti finissimi di 6-7 micron di diametro, perfettamente spazati di 1 micron gli uni dagli altri. Un filo di 1 mm è formato da circa 8.000 filamenti di Nb-Ti immersi in una matrice di rame. Tutto il processo è stato applicato a quantità "industriali" di materiale (per Lhc sono state prodotte 1.200 tonnellate di filo superconduttore) ma deve essere svolto con grande cura e precisione soprattutto

per evitare la minima contaminazione: particelle o inclusioni di pochi μm possono rovinare il processo causando rotture dei fili durante la fase di trafilatura. In totale per Lhc sono stati prodotti circa 300 mila km di filo superconduttore di alta qualità, una quantità che potrebbe coprire quasi l'intera distanza tra la Terra e la Luna. Le grandezze fisiche veramente decisive dal punto di vista delle prestazioni superconduttive sono la corrente critica, la magnetizzazione e la stabilità. Per quanto riguarda la corrente critica, cioè la massima corrente che si può utilizzare, essa è ottenuta alternando la trafilatura a freddo con trattamenti termici opportuni. Questi trattamenti sono una parte critica del *know-how* dalle varie industrie del settore; condotti intorno a 400 °C per 30 ore circa, questi trattamenti favoriscono la precipitazione della fase α-titanio; l'insieme del processo termo-meccanico fornisce il sistema di ancoraggio dei flussoidi (i quanti di flusso magnetico circondati da un vortice di corrente superconduttiva) che è basilare nel meccanismo di corrente critica. Il cavo superconduttore pur essendo un composito ha una escursione di soli 6 μm sullo spessore su tutta la lunghezza e deve risultare assolutamente senza difetti: una imperfezione di cavo superconduttore ha infatti costituito uno dei due soli casi di rigetto totale di un magnete (sui 1.700 grandi magneti costruiti per Lhc).

1. / 2. Filo superconduttore di Lhc. Sezione completa (fig. 1). Zoom della sezione (fig. 2). I filamenti di 6 μm di Nb-Ti (lega niobio-titanio) sono immersi in una matrice di rame puro, spazati di circa 1 μm.
3. Schema del processo di fabbricazione del filo: composizione del mono-filamento e inserimento del gruppo a esagoni.

[as] radici

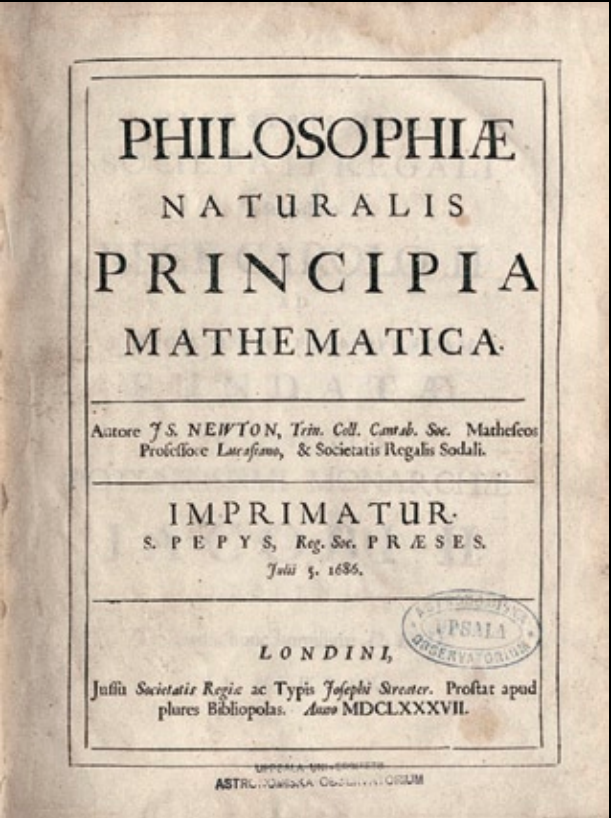
Da Newton a Higgs, breve storia della massa.

di Pasquale Tucci,

professore di Storia della Fisica
all'Università degli Studi di Milano
e direttore del Museo
Astronomico-Orto Botanico di Brera

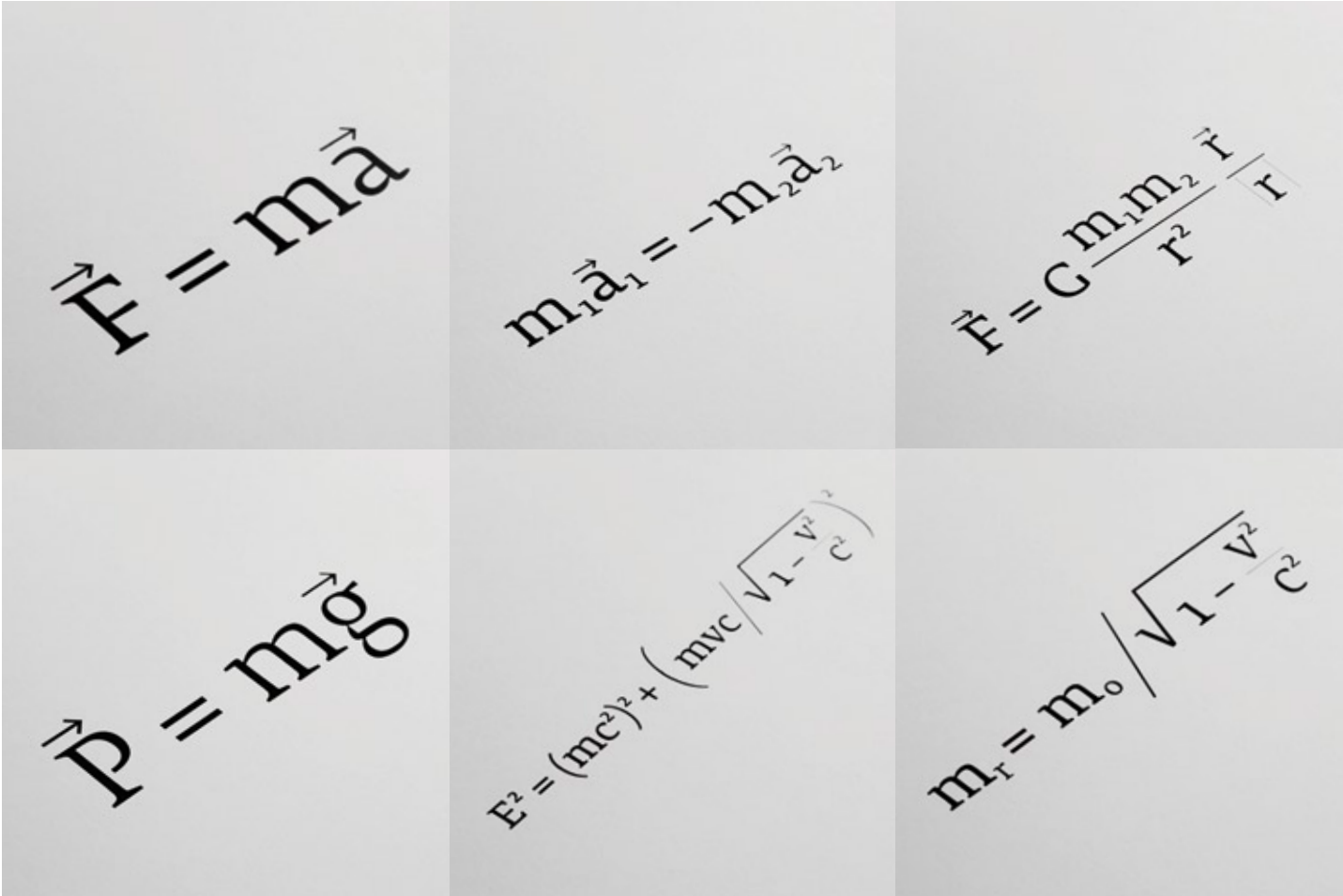
Nel 1687, esponendo nei *Principi Matematici di Filosofia Naturale* (vd. fig. a) i fondamenti di quella che in seguito sarà chiamata Meccanica Classica, Newton attribuisce alla materia – di cui postula l'esistenza – la proprietà di possedere una forza d'inerzia interna in grado di resistere a qualsiasi azione tenti di cambiarne lo stato di quiete o moto rettilineo uniforme. Ne discende la seguente definizione: la massa *m* è la misura della capacità di un corpo di opporsi alle variazioni di velocità e dà conto della sua *inerzia*. Per questa ragione la *m* che compare nella seconda legge del moto (fig. b) è chiamata *massa inerziale* ed è misurata per confronto con una massa di riferimento nota, attraverso la legge di azione e reazione (fig. c). Nella Meccanica di Newton vi è inoltre un'altra definizione: la massa *m* di un corpo fornisce la misura della sua capacità di interagire con altre masse in accordo con la legge della gravitazione universale (fig. d). È questa la ragione per cui chiamiamo *massa gravitazionale* la *m* che compare nella legge, che misuriamo con una bilancia: la forza peso è ottenuta immediatamente (fig. e) indicando con $\vec{g}$ l'accelerazione di gravità. Come aveva dimostrato Galilei, d'altra parte, fissato un qualsiasi punto della superficie terrestre,

l'accelerazione $\vec{g}$ è uguale per tutti i corpi in caduta libera, indipendentemente dalla materia della quale sono costituiti e dallo stato fisico nel quale si trovano. L'aspetto sorprendente è che misurando la massa dello stesso corpo mettendosi nelle condizioni sperimentali utili a evidenziare, in un caso la sua massa inerziale, in un altro la sua massa gravitazionale, si osserva che il valore numerico è lo stesso: a priori sarebbe stato difficile ipotizzare questo risultato, data la profonda differenza concettuale tra inerzia e gravità. L'eguaglianza tra massa inerziale e massa gravitazionale fu rilevata per la prima volta da Newton nel 1687 con esperimenti con il pendolo, poi da Friedrich Bessel nel 1827 e, ancora, da Loránd Eötvös nel 1890 (per approfondimenti, vd. *Asimmetrie* n. 5). Come osservò Einstein, il fenomeno è semplicemente registrato nella Meccanica Newtoniana, ma non è deducibile dalla teoria. È un indizio negletto il fatto che la stessa qualità di un corpo si manifesti, a seconda delle circostanze, come inerzia o come gravità e che siano le modalità di misura a rendere manifesta una o l'altra delle caratteristiche. Einstein considererà invece l'uguaglianza tra massa inerziale e massa gravitazionale la

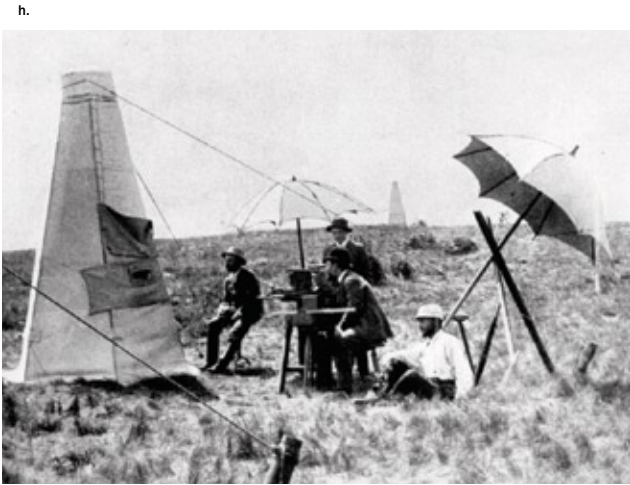


a.

a.
La copertina dell'opera fondamentale di Newton, *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* nell'edizione originale del 1688.



b.	c.	d.
e.	f.	g.

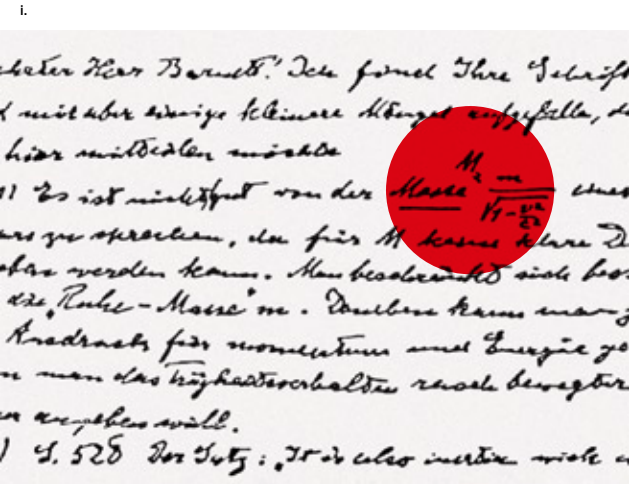


- b.**
La seconda legge del moto.
- c.**
La legge di azione e reazione.
- d.**
La legge della gravitazione universale definisce la forza di attrazione tra due masse m_1 e m_2 poste a distanza r . G è la costante di gravitazione universale.
- e.**
La forza peso di un corpo di massa m .
- f.**
Relazione tra l'energia totale e la quantità di moto relativistica di un corpo di massa m in moto a velocità v nella teoria della relatività speciale. c è la velocità della luce nel vuoto.
- g.**
Formula per la massa relativistica di un corpo di massa m_0 in moto a velocità v .

base empirica del principio della relatività generale (1915) che dà una spiegazione coerente della relazione tra inerzia e gravità. Un primo tentativo di mettere in relazione inerzia e gravità era stato fatto qualche decennio prima, nel 1883, in *La Meccanica nel suo sviluppo storico-critico*, da Ernst Mach, il quale aveva ipotizzato che l'inerzia non fosse altro che l'azione gravitazionale esercitata su un corpo dalle masse lontane distribuite nell'Universo. La massa, quindi, non era per Mach una caratteristica intrinseca del corpo, come pensava Newton, ma dipendeva dalle sue relazioni con altri corpi. Mentre per la Meccanica Newtoniana, se anche nell'Universo esistesse solo un corpo, questi avrebbe continuato ad avere massa inerziale, nella riformulazione di Mach della Meccanica esso non avrebbe né massa inerziale, né massa gravitazionale. Nel contesto della teoria della relatività speciale, se postuliamo l'esistenza della massa, ne facciamo discendere la definizione dalla relazione tra l'energia totale e la quantità di moto relativistica (fig. f). La massa, quindi, è definita come l'energia di un corpo in quiete (a meno della costante c^2) e il suo valore è misurato da un osservatore in un sistema di riferimento inerziale solidale alla massa

stessa. La m così misurata viene anche chiamata m_0 , ovvero *massa a riposo*, e la corrispondente E è chiamata *energia a riposo*, E_0 . La massa m è invariante in tutti i sistemi di riferimento inerziali e si conserva. L'energia totale, invece, si conserva ma non è invariante. È possibile definire la m anche in altro modo introducendo la cosiddetta *massa relativistica* (fig. g). Tuttavia, Einstein non gradiva tale approccio sebbene esso sia tuttora diffuso anche in trattazioni avanzate di teoria della relatività speciale (vd. fig. i). Nella Meccanica Quantistica, una particella di massa m può comportarsi come onda o come corpuscolo in base alle modalità di misura usate per rivelarla. Ma se ci mettiamo nelle condizioni sperimentali tali da evidenziare il suo comportamento corpuscolare, allora essa esibirà un comportamento del tutto analogo a quello previsto dalla teoria della relatività ristretta. Sia nella Meccanica Classica, sia nella teoria della relatività ristretta, sia nella Meccanica Quantistica l'origine della massa non è spiegata. Nella teoria della relatività generale (1915), sia la massa che l'energia sono la sorgente di un campo gravitazionale e il campo stesso ha una massa (vd. fig. h). La teoria

della relatività generale fa il tentativo di spiegare l'origine della massa. Come dirà Einstein stesso, nel 1949, in *Albert Einstein, scienziato e filosofo*, “[...] si resta colpiti dal dualismo insito nel fatto che il punto materiale (o punto massa) in senso newtoniano e il campo come continuo fisico stiano l'uno accanto all'altro come concetti elementari”. Il programma relativistico einsteiniano, elaborato quasi mezzo secolo prima, tentava di eliminare il fastidioso dualismo: la particella sarebbe semplicemente una zona di densità particolarmente elevata dell'energia di campo e il concetto di massa potrebbe essere dedotto dalle equazioni di campo unitamente alle equazioni di moto delle particelle. Ma il programma einsteiniano non riuscirà a raggiungere l'obiettivo di spiegare l'origine della massa. Il Modello Standard delle particelle elementari dà conto dell'origine della massa in maniera nuova e coerente. La massa, infatti, nascerebbe dall'interazione delle particelle con un campo quantomeccanico, il campo di Higgs; per confermare questa interpretazione sembrerebbe mancare all'appello solo un tassello: la particella associata all'omonimo campo, il bosone Higgs.



- h.**
La prima misura di campo gravitazionale condotta da Loránd Eötvös con la bilancia di torsione sulla collina di Ság, nel Transdanubio occidentale, nell'agosto del 1891. Eötvös è visibile in secondo piano, seduto davanti allo strumento.
- i.**
Lettera di Albert Einstein a Lincoln Barnett, del 19 giugno 1948. Einstein scriveva in tedesco, ma la lettera fu stilata e spedita in inglese. Il passaggio significativo in questo estratto è: “Non è bene introdurre il concetto di massa $M = m/(1 - v^2/c^2)^{1/2}$ di un corpo in movimento, perché di essa non può essere data una chiara definizione. È meglio non parlare di altri concetti di massa che non siano quello della massa a riposo. Piuttosto che introdurre M è meglio parlare di momento e di energia di un corpo in movimento”.



Molte reti per una Grid

La rete del futuro che condivide risorse di calcolo e memoria.

di Mirco Mazzucato e Vincenzo Napolano

Centoquaranta centri di calcolo di trentatrè paesi diversi, milioni di gigabyte immagazzinati ed elaborati ogni anno, migliaia di scienziati coinvolti nella gestione e nell’analisi dei dati, che già oggi possono disporre facilmente della potenza di calcolo di decine di migliaia di calcolatori coordinata e moltiplicata a fini scientifici. È la Grid di Lhc, sviluppata per consentire a migliaia di ricercatori di diversi paesi di analizzare i prodotti di milioni di collisioni prodotte dall’acceleratore, una volta che sarà entrato in funzione. Grazie a questo lavoro i fisici sperano di scovare l’origine della materia oscura e il supermondo, le tracce dello sfuggente bosone di Higgs e tentare di comprendere meglio le leggi della fisica all’origine dell’Universo e il Big Bang.

Per questo sarà necessaria l’analisi dei 15 milioni di gigabyte di dati, prodotti ogni anno da Lhc, pari a una torre di cd alta 20 chilometri, ovvero come 60 torri Eiffel una sull’altra.

La gestione e l’analisi di questa immensa mole di dati avverrà attraverso le migliaia di nodi di calcolo della Lhc-Grid sparsi su tutto il pianeta e organizzati in diversi livelli. Gli undici del primo “livello” (Tier 1), tra cui il Cnaf (il centro per la ricerca e lo sviluppo delle tecnologie informatiche dell’Infn) di Bologna, riceveranno direttamente dal Cern i dati prodotti dall’acceleratore, per elaborarli, analizzarli, archivarli e smistarli successivamente agli altri centri sul pianeta.

La Grid di Lhc a oggi è l’unica ad avere un’estensione mondiale, con siti nei diversi continenti, anche se non è l’unica griglia di condivisione delle risorse di calcolo e memoria.

Il termine *grid computing* venne coniato in un lungimirante libro di Ian Foster e Karl Kesselman *The Grid: blueprint for a new computing infrastructure* (“La Grid: il progetto di una nuova infrastruttura di calcolo”), pubblicato negli Stati Uniti nel 1999. La Grid veniva annunciata dagli autori come un naturale potenziamento della rete, una nuova applicazione in grado di rendere fruibile universalmente la potenza e le risorse di calcolo, fornite da centri sparsi in tutto il mondo, così come il *world wide web* aveva reso universale e libero l’accesso alle informazioni diffuse in rete.

La metafora della “griglia” rifletteva l’idea che un utente possa utilizzare tutte le risorse di calcolo che gli occorrono con un semplice collegamento alla rete, senza sapere da dove vengono o come siano prodotte, come avviene, ad esempio, per la rete dell’energia elettrica.

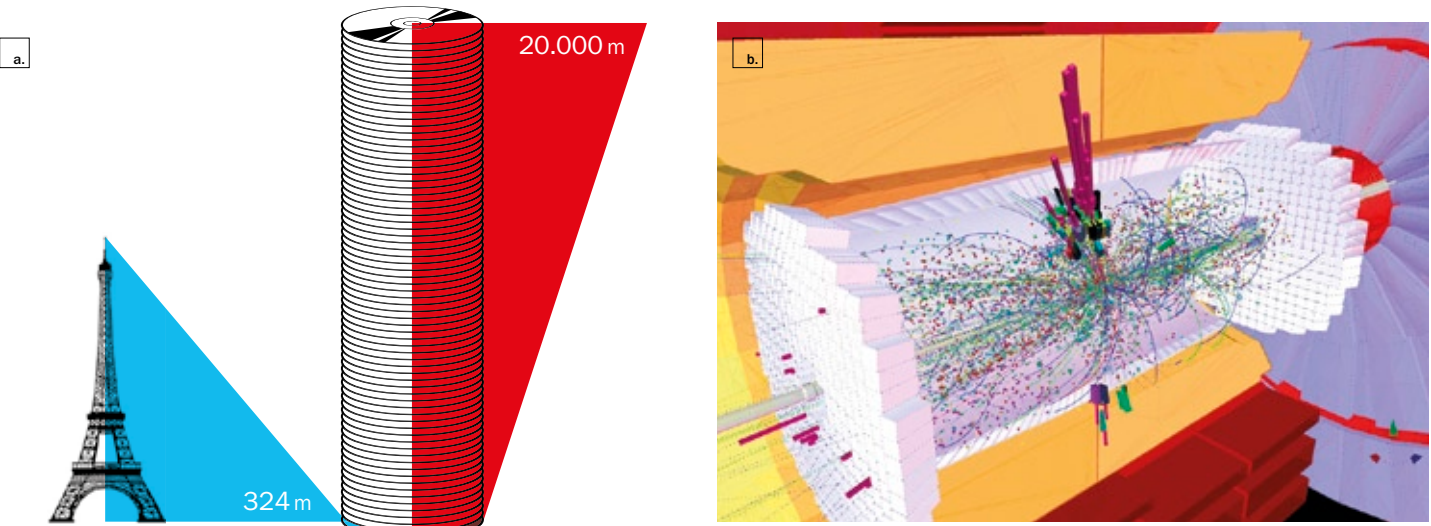
E proprio alla fine dello stesso anno partiva il pionieristico progetto italiano Infn-Grid, che insieme al progetto europeo 2001 Datagrid e ai successivi progetti Egee (*Enabling Grids for E-science*) e infine il *World-wide Lhc Computing Grid* (Wlcg) coordinati dal Cern, hanno dimostrato la possibilità concreta di costruire una nuova infrastruttura dotata di queste capacità. Una Grid capace di fatto di fornire a tutto il mondo della ricerca un accesso uniforme e condiviso, non solo alle risorse di calcolo, ma anche ai grandi archivi di dati sparsi in vari paesi e collegati tramite Internet, che appaiono all’utente come una grande risorsa globale, dotata di un’unica interfaccia.

Le griglie rispondono a un bisogno che viene direttamente dal mondo della ricerca, come è accaduto

a suo tempo per il web. La condivisione di risorse di calcolo e archivi di dati facilitano infatti grandemente le attività delle comunità scientifiche e dei gruppi di ricerca differenti, che partecipano allo stesso progetto. Grazie inoltre alla semplificazione e uniformità delle regole di accesso, i ricercatori possono accedere in modo più semplice, agevole ed economicamente vantaggioso, a tutti gli archivi e alle risorse messe in comune, anche se non sono amministrate centralmente, ma appartengono a più proprietari completamente indipendenti. Questi standard di comunicazione e accesso sono inoltre generali e *open source*, ovvero possono essere acquisiti e usati liberamente

e gratuitamente, per garantire l'accesso alle risorse disponibili anche da parte degli utenti di altri settori scientifici. È necessario però attribuire ai membri delle varie comunità diritti di accesso e utilizzo ben definiti e definire e concordare politiche di sicurezza e di uso comuni. Da questo punto di vista il modello Grid si è rivelato un grande successo. L'infrastruttura di Egee oggi in Europa permette ormai a più di 10.000 ricercatori delle più svariate discipline di utilizzare in modo uniforme per i propri calcoli e i propri dati più di 80.000 nodi di calcolo e 20 milioni di miliardi di byte (petabyte) di archivi, localizzati in circa 250 centri europei grandi

a. / b.
La Grid è stata progettata per immagazzinare e rendere accessibili i 15 milioni di Gigabyte di dati che saranno prodotti ogni anno da Lhc, pari a una torre di cd di 20.000 metri, circa 61 volte l'altezza della Torre Eiffel (324 m). A destra, la simulazione di uno dei milioni di eventi che saranno prodotti in Lhc: i prodotti di una collisione tra frasci di protoni registrati nel rivelatore Cms.



[as] box

Rapidi come nuvole

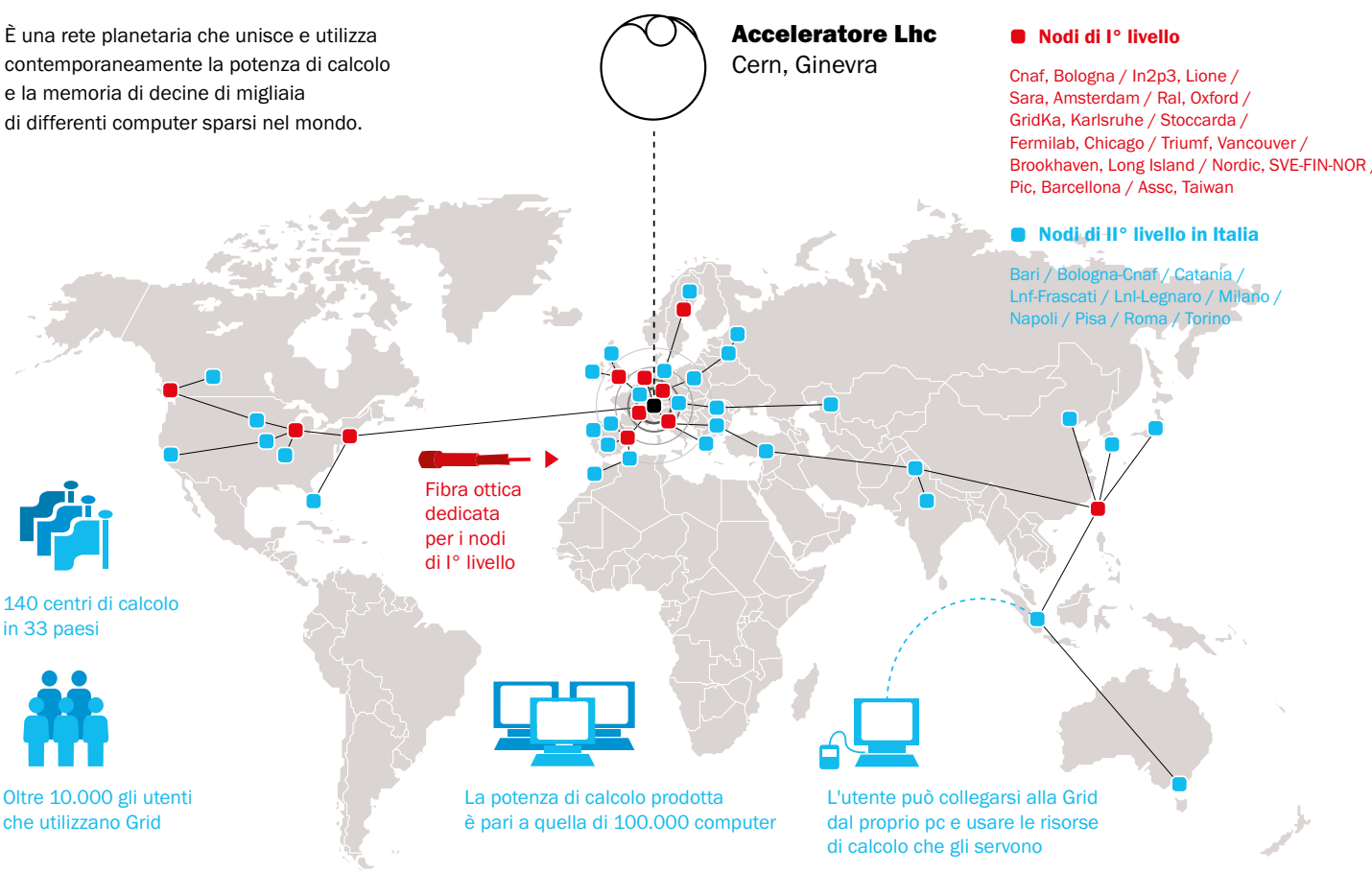
Nell'ultimo periodo una nuova applicazione proposta a livello commerciale dalle grandi compagnie Usa (ad esempio Google e Amazon), chiamata *Cloud Computing*, ha cominciato a offrire con successo agli utenti la possibilità di ospitare a pagamento le proprie applicazioni e i propri dati su un'unica risorsa di calcolo e memoria centrale, sulla base di protocolli privati e rinunciando a ogni tentativo di standard comuni di accesso da parte dei differenti fornitori. Il Cloud Computing offre un servizio che permette agli utenti di accedere ad ambienti virtuali creati secondo le loro necessità, ma senza avere nessun controllo sopra l'infrastruttura tecnologica che li supporta, nè garanzie di poter cambiare fornitore, senza dover imbarcarsi in un lavoro tedioso di adattamento. Le risorse e le interfacce sono amministrate centralmente da un unico proprietario, che agisce in completa autonomia con lo scopo di fidelizzare

il cliente. Un'analisi preliminare effettuata dal Cern e da Egee ha mostrato che questa offerta, oltre a non essere ancora economicamente vantaggiosa rispetto ai sistemi commerciali in uso nel mondo accademico, è oggi più adatta ad applicazioni semplici che alle complesse applicazioni scientifiche, che richiedono architetture di calcolo integrate con quelle dei grandi archivi di dati. Ha tuttavia riscosso un notevole successo per la facilità d'uso da parte degli utenti commerciali, che in questo modo hanno potuto eliminare i loro centri privati, quando questi non erano pienamente utilizzati o comunque non economicamente convenienti. In futuro, se ci sarà una convenienza economica, è possibile immaginare le risorse appartenenti a fornitori commerciali di Cloud Computing tra quelle condivise, grazie alla Grid, dalle comunità di ricerca.

[Mirco Mazzucato]

Che cos'è la Grid

È una rete planetaria che unisce e utilizza contemporaneamente la potenza di calcolo e la memoria di decine di migliaia di differenti computer sparsi nel mondo.



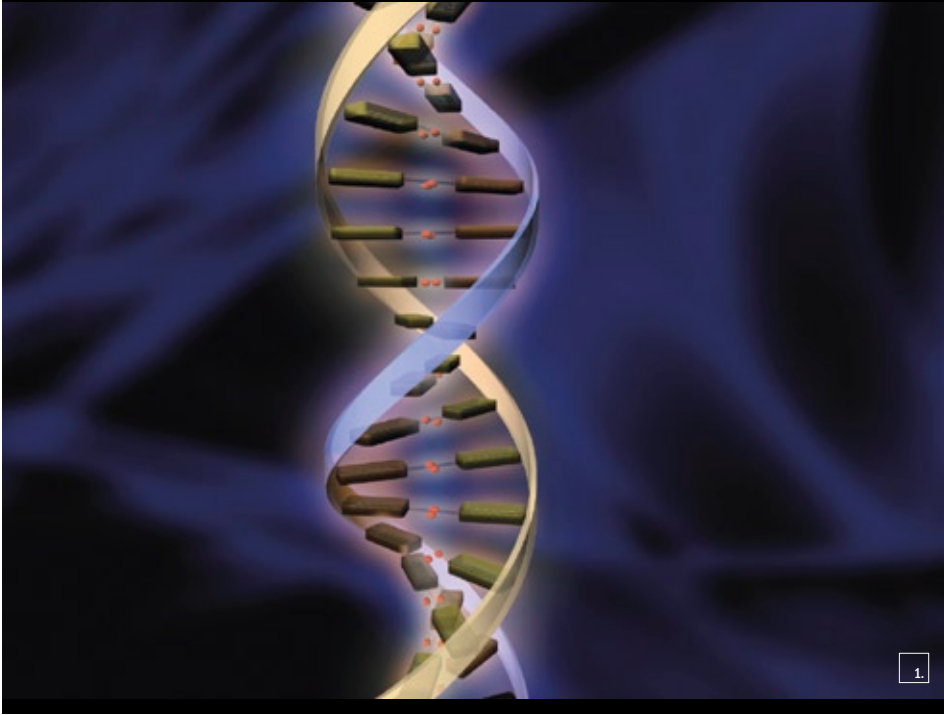
e piccoli, che prima erano utilizzabili solo a livello locale, con un aumento costante della potenza offerta e del numero di utilizzatori. La Grid non solo fornisce la “colla” tecnologica per raggiungere l'obiettivo di un uso efficiente di tutte le risorse disponibili, ma ne definisce anche le politiche necessarie sia per gli utilizzatori che per i fornitori di risorse. La Grid dunque viene oggi utilizzata dagli scienziati per affrontare problemi cruciali ed estremamente complessi come studiare l'origine e l'evoluzione dell'Universo, costruire molecole in grado di debellare la malaria o combattere il cancro, prevedere l'effetto sulle nostre vite del riscaldamento globale, gestire situazioni di crisi ambientali o sanitarie. Tuttavia, anche se il ruolo essenziale della standardizzazione per una diffusione generale delle griglie è sempre stato riconosciuto da

tutti, esigenze pratiche di una rapida risposta ai bisogni specifici di classi di utenti diversi hanno portato, come ai tempi della nascita di Internet, allo sviluppo di protocolli grid indipendenti che sono stati poi utilizzati nelle varie grid nazionali come, ad esempio, Egee in Europa, Osg negli USA, Naregi in Giappone. Questo ha generato difficoltà di comunicazione tra le differenti Grid, che solo recentemente hanno cominciato a essere affrontati sistematicamente e risolti. Ed è proprio il progetto *World-wide Lhc Computing Grid* (Wlcg) dei fisici che lavorano al Large Hadron Collider del Cern a essere il primo esempio di un'infrastruttura Grid mondiale, in cui i vari spezzoni a livello europeo, statunitense e asiatico, se pure dotati di servizi grid diversi, riescono a operare insieme grazie a uno sforzo d'integrazione delle varie interfacce e all'utilizzo di alcuni servizi comuni.

La Grid che serve alla medicina

I servizi grid sviluppati per la fisica delle alte energie consentono di costruire archivi condivisi ed elaborare dati, distribuiti a livello planetario in centri di calcolo diversi, esigenza che si ripresenta con molte analogie in medicina. La sempre maggiore importanza della prevenzione e quindi delle tecnologie di *imaging* digitale comporta infatti una produzione di grandi quantità di dati, distribuiti geograficamente, poiché provengono dalle numerose strutture presenti sul territorio. Alcune applicazioni mediche di servizi grid esistono già, in particolare nei casi in cui siano necessarie molte risorse di calcolo e brevi tempi di risposta, impiegando in parallelo risorse di calcolo e memoria differenti; in altri casi esistono dei prototipi, ad esempio per la ricerca tramite algoritmi di anomalie in immagini

mediche (mammografie, tomografie del polmone). C'è tuttavia un punto cruciale che differenzia le applicazioni mediche da quelle di fisica delle particelle: la riservatezza dei dati e il controllo rigoroso degli accessi, che rende opportuna una Grid dedicata alla medicina, rigorosamente inaccessibile ad altre applicazioni. La tecnologia per garantire questa funzionalità esiste. All'orizzonte ci potrebbe quindi essere un sistema integrato con servizi grid e web per la gestione ed elaborazione di dati e immagini dei pazienti, per la pianificazione dell'accesso ai servizi sanitari e per la gestione personalizzata e l'accesso tramite Internet alle cartelle cliniche personali, come se si trattasse di una speciale casella di posta elettronica. [Piergiorgio Cerello]



1. La Grid oggi è già utilizzata per calcoli o simulazioni legati alla biologia molecolare o alla previsione dei cambiamenti climatici.

Biografia
Piergiorgio Cerello è ricercatore presso la sezione Infn di Torino. Collabora all'esperimento Alice di Lhc e coordina il progetto MAGIC-5 per lo sviluppo di algoritmi di elaborazione di immagini mediche.

Biografia
Mirco Mazzucato è direttore del Cnaf, il Centro Nazionale di Calcolo avanzato dell'Infn. Rappresenta l'Infn nel progetto World Lhc Computing Grid del Cern e coordina la ricerca per la costruzione dell'*Italian Grid Infrastructure* (Igi). È stato coordinatore italiano di alcuni esperimenti di fisica delle alte energie attuati al Cern.

Link sul web
<http://grid.infn.it>
<http://lcg.web.cern.ch/LCG>
<http://www.eu-egee.org>
<http://www.italiangrid.org>
<http://www.isgtw.org>

[as] incontri

Grandi fisici incontrano i giovani.

La Classe IV B del Liceo scientifico statale Bruno Touschek di Grottaferrata e le insegnanti Tullia Gaddi e Gilda Bisegni

28 gennaio 2009, in occasione del trentennale della morte di Bruno Touschek il Liceo Scientifico Statale omonimo di Grottaferrata ha avuto l'onore di ospitare una tavola rotonda, alla quale hanno preso parte illustri fisici quali Giorgio Salvini, Nicola Cabibbo, Carlo Bernardini, Giulia Pancheri, Mario Greco e Mario Calvetti. Tutti hanno contribuito a illustrare la figura di Touschek non solo come scienziato, ma anche come amico e uomo. Per noi studenti si è trattato di un'esperienza unica, poiché abbiamo avuto la fortuna di vedere questi grandi personaggi riuniti e abbiamo potuto conoscerli anche a livello umano, grazie alle loro singolari relazioni con Touschek. Ha aperto e diretto la conferenza Giulia Pancheri, collaboratrice del grande scienziato austriaco. Per introdurre l'atmosfera in cui questi fisici sono vissuti, la dottoressa Pancheri ci ha mostrato il video di una lezione tenuta da Touschek e ha proseguito raccontando le travagliate

vicende della vita dello scienziato durante la seconda guerra mondiale e l'esperienza dei campi di concentramento. Carlo Bernardini, amico e collaboratore del fisico, ha riportato di Touschek il lato più umano, raccontando del suo senso dell'umorismo, della passione per il disegno e per le moto, del suo entusiasmo e della determinazione nel lavoro. A seguire, Nicola Cabibbo ha messo in evidenza le doti di Touschek insegnante e scienziato, la straordinaria capacità nello spiegare i problemi più complessi rendendoli comprensibili a tutti. Cabibbo ha inoltre illustrato i più importanti contributi scientifici dello scienziato, quali l'acceleratore di particelle AdA (Anello di Accumulazione) e l'effetto *Touschek*. Mario Greco, da parte sua, ha raccontato della comune passione per il mare e per la fisica. Giorgio Salvini, coordinatore di alcuni lavori di Touschek, e Mario Calvetti, attuale direttore del laboratorio Infn di Frascati, ci hanno dato preziosi consigli per il nostro

futuro. Sebbene in modo diverso, tutti hanno contribuito a delineare la figura di un uomo geniale, coraggioso, umile, testardo e ironico, che amava profondamente ciò che faceva e che, in difesa dei propri obiettivi, non si arrendeva alle difficoltà della vita, come la guerra, né a quelle imposte da qualche burocrate italiano. Ogni relatore ha concluso il proprio discorso rivolgendo un appello e un augurio a noi giovani presenti alla conferenza, quello di prendere come modello Bruno Touschek e di appassionarci maggiormente alla fisica, perché grazie a essa possiamo svelare i misteri del mondo in cui viviamo. Vorremmo pertanto concludere questo articolo con le parole che ci ha indirizzato Giorgio Salvini: "Questa sera aprite la finestra, guardate le stelle e chiedetevi di cosa sono fatte". Queste parole dimostrano il profondo amore che i fisici nutrono per il loro lavoro e la passione per la conoscenza che sono stati capaci di trasmettere.

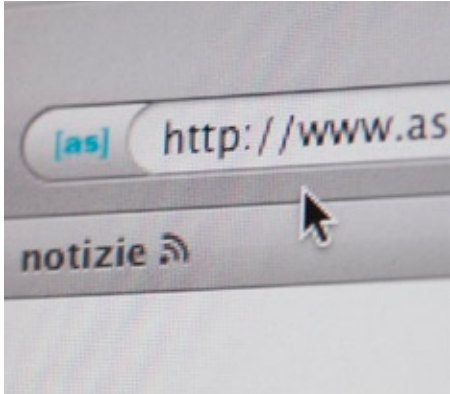


a. Gli studenti della IV B del Liceo scientifico statale Bruno Touschek di Grottaferrata.
b. I partecipanti alla tavola rotonda "Bruno Touschek, l'uomo e lo scienziato" al Liceo Scientifico Bruno Touschek di Grottaferrata. Da sinistra: Mario Greco, Mario Calvetti, Signora Calvetti, Nicola Cabibbo, Carlo Bernardini, Adelina Cardillo (Presidente del Liceo), Signora Bernardini, Giorgio Salvini, Signora Salvini, Tullia Gaddi (insegnante del Liceo), Giulia Pancheri.

Segnali dall'antimateria_Pamela (*Payload for Antimatter Matter Exploration and Light - nuclei Astrophysics*), il satellite internazionale coordinato dai ricercatori dell'Infn, ha recentemente osservato importanti segnali di antimateria in una regione vicina alla nostra galassia. La scoperta, pubblicata su *Nature* il 2 aprile scorso, ha importanti implicazioni anche sulle possibili spiegazioni della materia oscura, l'ignota forma di materia che compone più di un quinto di tutto il nostro Universo. Da circa tre anni Pamela orbita intorno alla Terra a un'altezza compresa tra 350 e 600 chilometri: cerca l'antimateria nei raggi cosmici, le particelle accelerate a velocità vicine a quella della luce in seguito a fenomeni violenti nel Cosmo, come le esplosioni di supernovae. Sono soprattutto protoni e nuclei di atomi, ma vi si trovano anche particelle di antimateria e in particolare antiprotoni e antielettroni (positroni). I risultati pubblicati su *Nature* evidenziano un'anomalia nel rapporto tra il numero di positroni e di elettroni rivelati: un'abbondanza di positroni che trova una possibile spiegazione in segnali di materia oscura, anche se non si possono escludere per ora contributi dovuti alla presenza di buchi neri e pulsar. L'ipotesi sostenuta dal team internazionale che analizza quotidianamente i dati inviati da Pamela sulla Terra è che le particelle di materia oscura siano presenti nella nostra galassia perché attratte dalla forza di gravità. Annichilandosi, produrrebbero sciami di particelle secondarie di alta energia e, in particolare, le particelle di antimateria che Pamela sta rivelando. [F.S.]



WWW _L'acronimo di tre lettere che digitiamo prima di (quasi) ogni indirizzo in Internet, ha compiuto 20 anni. Era il 13 marzo del 1989 quando T. J. Berners-Lee, fisico inglese in forza al Cern di Ginevra, presentò per la prima volta ai suoi responsabili un documento destinato a dar vita a una nuova era nell'industria e nella società globale. "Vago, ma interessante", fu il commento di uno dei responsabili. In quel periodo al Cern lavoravano migliaia di scienziati da tutto il mondo, ognuno con il suo computer, la sua lingua e il suo sistema operativo. Il Lep era nel vivo della sua attività e i fisici avevano la forte esigenza di scambiarsi i dati da analizzare, cioè di comunicare senza dover conoscere gli indirizzi "tecnici" del computer di ciascun collega. Ed ecco che T. J. Berners-Lee ideò il progetto intitolato *Gestione dei dati: una proposta*, che gettò le basi per il world wide web, quell'alfabeto universale che tutti i computer connessi nel mondo oggi utilizzano continuamente. Il futuro della rete di oggi, invece, si chiama Grid: quando l'acceleratore Lhc sarà in fase di presa dati, più di 200 centri di calcolo in 33 paesi connessi dalla fibra ottica analizzeranno qualcosa come 20 milioni di gigabyte l'anno. [C.P.]



SuperBeam _Un'innovativa metodologia sviluppata ai Laboratori Nazionali di Frascati ha permesso di migliorare notevolmente l'efficienza delle collisioni tra particelle negli acceleratori aumentandone la luminosità, il parametro fondamentale che determina il numero degli urti. Grazie alla tecnica sviluppata dal gruppo guidato da Pantaleo Raimondi, l'acceleratore Dafne di Frascati è oggi, tra le macchine che lavorano nella stessa regione d'energia, quella di più alta luminosità al mondo. La nuova metodologia rende possibile anche gli studi per lo sviluppo di un innovativo acceleratore italiano, la SuperB: una potente *B-factory* (fabbrica di particelle B) con una luminosità fino a 100 volte superiore rispetto alle due esistenti nel mondo, in California e in Giappone. Nella SuperB saranno fatti scontrare fasci di elettroni e positroni, con l'obiettivo di produrre grandi quantità di *mesoni B* (particelle formate da due quark, dei quali uno di tipo b, bottom) e studiarne i modi di decadimento molto rari. Gli esperimenti permetteranno di studiare, tra gli altri, il fenomeno noto come violazione della simmetria CP, secondo il quale non può esistere un mondo, immagine allo specchio del nostro, nel quale le particelle siano sostituite dalle loro antiparticelle, manifestando così la capacità della natura di distinguere tra materia e antimateria. Lo scorso dicembre l'Infn ha approvato l'inizio della fase di studio di fattibilità di SuperB, i cui risultati sono previsti entro i prossimi due anni. [F.S.]



Per approfondimenti su materia oscura e antimateria si vedano rispettivamente i numeri 4 e 7 di *Asimmetrie*.



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 delle 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 8068547
schiavon@lnl.infn.it
www.lnl.infn.it

Laboratori Nazionali del Sud (Lns)
T + 39 095 542296
sislns@lns.infn.it
www.lns.infn.it

Ulteriori informazioni per visitare i laboratori dell'Infn si trovano alla pagina www.infn.it/educational



www.infn.it

rivista on line
www.asimmetrie.it