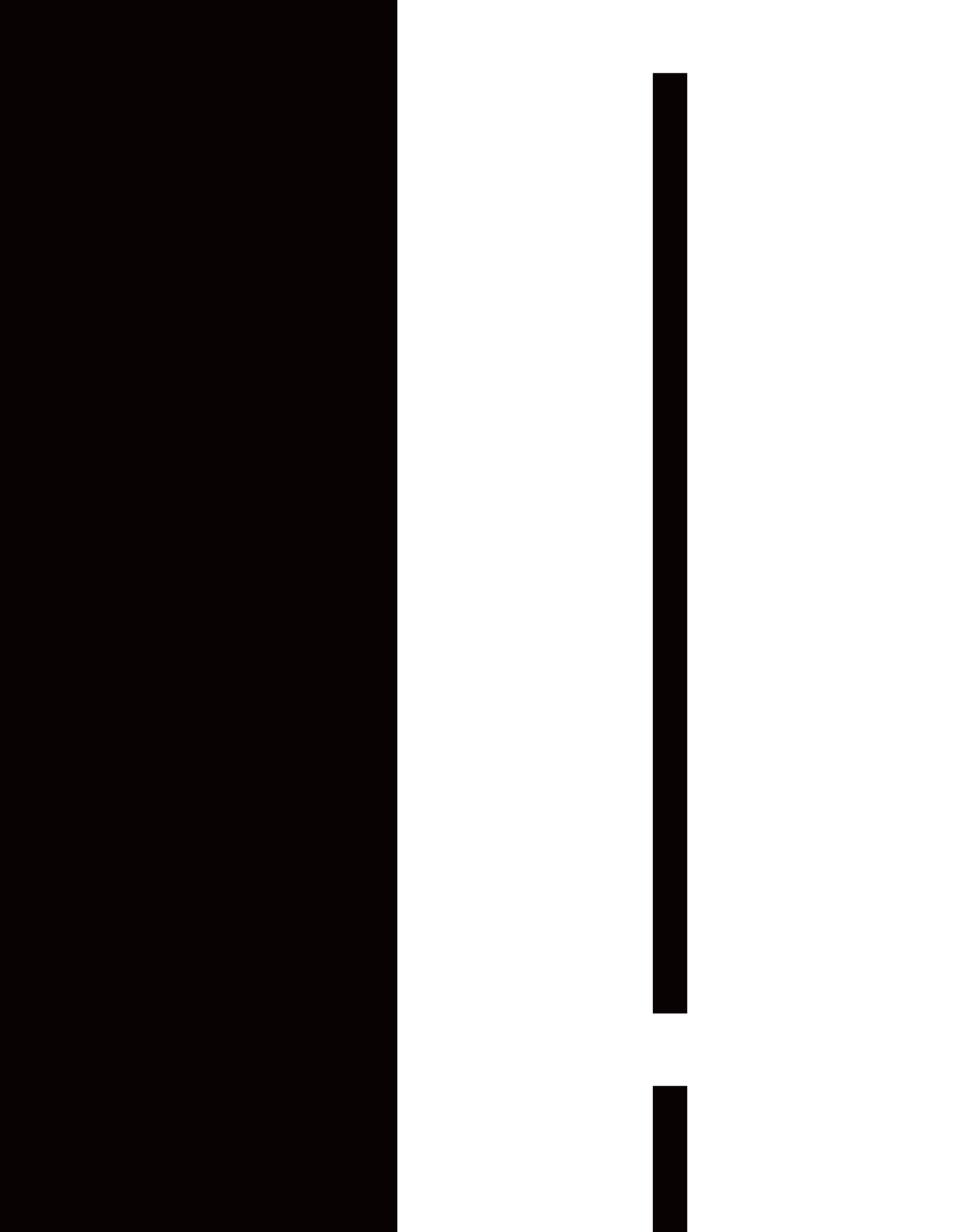


[1964]

anno 9 numero **16** / 3.14

asimmetrie

rivista semestrale dell'Istituto
Nazionale di Fisica Nucleare



asimmetrie

Cari lettori di Asimmetrie,

Ma quante cose sono successe nel 1964? È quasi incredibile che in un solo anno si condensino un numero impressionante di lavori scientifici, teorici e sperimentali, che introducono, anzi impongono e guidano, la ricerca dei successivi 50 anni. Higgs, Englert e Brout che ci presentano il bosone che verrà scoperto nel 2012. Cronin e Fitch ci indicano che le particelle (alcune almeno) viste allo specchio non sono le stesse, neanche se si scambiano particelle e antiparticelle. È la chiave che dovrebbe aprirci la porta del mistero della scomparsa dell'antimateria e giustificare la nostra stessa esistenza. Peccato che non abbiamo ancora trovato la serratura in cui infilarla!

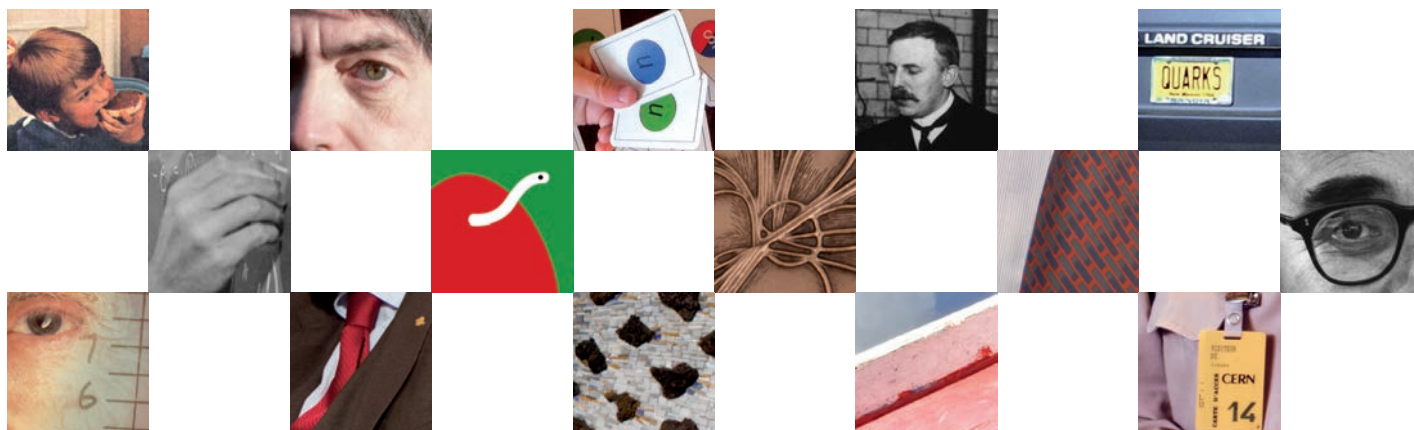
I quark! Ebbene sì, la parola senza senso creata da Joyce viene introdotta in modo simbolico, matematico, fisico per identificare una proprietà delle troppe particelle che ormai erano state scoperte fino a quel giorno e che, proprio per la loro abbondanza, non sembravano meritare il titolo di "elementari". E poi è stato scoperto che i quark esistono veramente, che il protone e il neutrone sono fatti di quark, ma che, per una bizzarra proprietà della natura, ci è, e sempre ci sarà, impedito di prenderne uno in mano! Per esercitare al meglio la nostra fantasia (e non essere accusati di essere aridi osservatori e studiosi della realtà), le due proprietà che giustificano il comportamento peculiare di questi componenti ultimi della materia le abbiamo chiamate *sapore* e *colore*. Un riferimento chiaro al nostro gusto.

Ma il 1964 lega anche l'infinitamente piccolo, la particella indivisibile di Democrito, con l'infinito del cosmo. Penzias e Wilson osservano per caso (*serendipitous discovery* in inglese) la radiazione cosmica di fondo. Quei fotoni che vagano per l'universo dal primo istante e che sono la prova del Big Bang. Chissà se nel futuro chi ci seguirà sarà così fortunato da poter indicare un anno altrettanto importante per la storia della scienza?

A proposito... nel 1964 il Festival di Sanremo lo vinse Gigliola Cinquetti, il Giro d'Italia Jacques Anquetil e... udite, udite... il Campionato di Calcio lo vinse il Bologna.

Buona lettura.

Fernando Ferroni
presidente Infn



asimmetrie

Rivista dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

Semestrale, anno 9,
numero 16 marzo 2014

direttore responsabile

Fernando Ferroni, *presidente Infn*

direttore comitato scientifico

Egidio Longo

comitato scientifico

Vincenzo Barone
Massimo Pietroni
Giorgio Riccobene
Barbara Sciascia

caporedattore

Catia Peduto

redazione

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

hanno collaborato

Giovanni Battimelli, Marcella Bona,
Beatrice Bressan, Michele Cossy,ro,
Stefano Forte, Paolo Nason, Roberto
Mussa, Marco Pivato, Fabio Sciarrino,
Massimo Testa

contatti redazione

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

impaginazione

Istituto Arti Grafiche Mengarelli

stampa

IAG Mengarelli

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

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

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

Finita di stampare nel mese di marzo 2014.
Tiratura 20.000 copie.

come abbonarsi

L'abbonamento è gratuito.

Tre modi per abbonarsi:

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

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

Contattare la redazione

sito internet

**Asimmetrie 16 e tutti i numeri
precedenti della rivista sono disponibili
anche online su www.asimmetrie.it**

e-magazine

**Asimmetrie 16 è anche disponibile in
versione digitale, ricca di ulteriori
contenuti multimediali, come app di
iOS e Android sull'Apple Store e nel
Google Play Store.**

crediti iconografici

Foto copertina ©JanPietruszka (depositphotos)
// foto p. 4 ©JanPietruszka (depositphotos);
foto a p. 5 © Ferrero; fig. b p. 6 © Asimmetrie-
Infn; foto c p. 7 © AIP Emilio Segre Visual
Archives, Physics Today Collection; foto d p. 8
© Lawrence Berkeley National Laboratory,
courtesy AIP Emilio Segre Visual Archives; foto
e p. 9 ©Brookhaven National Laboratory; foto f
p. 10 ©Corbin O'Grady Studio/Science Photo
Library// figg. a, b, c p. 11 ©Asimmetrie-Infn
// fig. pp. 12-13 ©Asimmetrie-Infn // foto a p.
14 © Stuart Austin; foto 1 p. 15 ©PAColl-0091-
1-011 Sir Ernest Marsden collection, Alexander
Turnbull Library, Wellington; fig. b, c pp. 16-17
© ©Asimmetrie-Infn // foto a p. 18 © Kevin
Fleming/Corbis; fig. 1 p. 19 ©Asimmetrie-Infn;
fig. 1 p. 20 ©Asimmetrie-Infn // foto a p. 21
©AIP Emilio Segre Visual Archives, Physics
Today Collection; foto b p. 22 ©Stanford
University; foto c p. 23 ©Slac // foto a p. 24
©Brookhaven National Laboratory; figg. b, c
pp. 25-26 ©Asimmetrie-Infn // foto a p. 27
©Victoria Henriksson/The Royal Academy of
Sciences; fig. b p. 28 ©Asimmetrie-Infn; foto c
p. 29 ©AIP Emilio Segre Visual Archives,
Physics Today Collection // foto a p. 30 ©Infn;
foto c p. 32 ©Lloyd DeGrane, University of
Chicago // foto a p. 33 ©Asimmetrie-Infn/F.
Cuicchio/G. Riccobene; fig. b p. 34
©Asimmetrie-Infn; foto c p. 35 © Marcella
Bona // fig. p. 38 ©Asimmetrie-Infn; foto c p.
39 ©CNRS Phototheque - CHATIN Jerome //
foto b p. 41 © Corriere della Sera // foto a,b
pp. 42-42 ©Angelo Pitrone // foto a p. 44
©Library of Congress; fig. p. 45 ©Asimmetrie-
Infn // foto a p. 46 ©BenFrantzDale
(wikimedia) // foto p. 48 ©Francesca Cuicchio.

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

as

16 / 3.14 [1964]

Ritorno al futuro di Giovanni Battimelli	4	Specchi imperfetti di Marcella Bona	33
[as] La forza del gruppo.	11	Grovigli quantistici di Fabio Sciarrino	36
[as] Ieri, oggi, domani.	12	[as] intersezioni Attacco al nucleare italiano. di Marco Pivato	40
I semi delle cose di Stefano Forte <i>approfondimento di Vincenzo Barone</i>	14	[as] con altri occhi Nelle particelle dell'arte. di Michele Cossyro	42
A tinte forti di Paolo Nason <i>approfondimento di Giorgio Riccobene</i>	18	[as] spazi Balle di scienza. di Vincenzo Napolano	44
[as] radici Libertà impossibile. di Francesca Scianitti	21	[as] traiettorie On the road. di Eleonora Cossi	46
Fascino svelato di Roberto Mussa	24	[as] illuminazioni Una partita a quark. di Beatrice Bressan	48
Rotture spontanee di Massimo Testa	27		
Fertili analogie di Antonella Varaschin	30		

Ritorno al futuro

Idee e scoperte di un annus mirabilis

di Giovanni Battimelli



“It is an ideal, for which I am prepared to die”. Termina così il discorso al processo per sabotaggio pronunciato nell'aprile del 1964 dall'avvocato sudafricano Nelson Mandela, a quel tempo praticamente uno sconosciuto al di fuori del Sudafrica. Mandela sarebbe diventato successivamente uno dei simboli della lotta contro l'apartheid e insignito del premio Nobel per la pace nel 1993. Sempre nell'aprile di quello stesso 1964, i primi vasetti di una crema di cioccolato alle nocciole escono da una piccola industria dolciaria del Piemonte. La crema è la Nutella e sarebbe diventata un mito per generazioni di bambini. Nel 1964 anche nella fisica delle particelle nulla di particolare sembra accadere. Ma, come Mandela e la Nutella oggi, a cinquanta anni di distanza, sono passati alla storia, così anche nella fisica le idee nate in quell'anno hanno acquisito un'importanza tale da far ricordare il 1964 come un *annus mirabilis*.

Nel febbraio del 1964 su Scientific American apparve un articolo di rassegna sullo stato della fisica delle particelle, dedicato in particolare alle particelle soggette all'interazione forte, quelle che oggi chiamiamo genericamente *adroni*, dal nome introdotto nel 1962 dal fisico russo Lev Borisovich Okun, allora ancora poco usato. L'articolo iniziava sottolineando la proliferazione del numero di particelle scoperte, la conseguente difficoltà di assegnare loro lo status di particelle elementari (cioè di oggetti privi di una struttura interna), nonché la situazione di stallo della teoria, apparentemente incapace di fornire un quadro complessivo coerente.

Nel breve volgere di anni tra il 1957 e il 1963, mentre la famiglia dei leptoni (le particelle soggette solo all'interazione debole) era cresciuta di un solo elemento (si era scoperto che il neutrino associato al muone era diverso da quello associato all'elettrone), portandone il numero totale a quattro, il numero di adroni noti era passato da 23 a 82. La situazione era paragonata a quella della fisica atomica negli anni venti, prima della formulazione della meccanica quantistica: una ricca e crescente fenomenologia di righe spettrali, in assenza di un qualunque quadro teorico che permettesse di classificarle, spiegarle e (soprattutto) prevederle.

Un promettente passo avanti era stato fatto negli anni precedenti da uno degli autori dell'articolo apparso su Scientific American, Murray Gell-Mann. L'idea era riconoscere una regolarità nell'apparente caos delle particelle classificandole in strutture formali secondo alcuni principi generali di simmetria. Il linguaggio matematico che permetteva di dare corpo a questa classificazione basata sulle simmetrie era quello della *teoria dei gruppi*, una branca della matematica il cui uso in fisica teorica era stato pionieristicamente introdotto, tra gli altri, da Eugene Wigner, negli anni '30. La teoria dei gruppi, guardata inizialmente con sospetto dai fisici, esprime in forma rigorosa la connessione profonda tra principi di simmetria e leggi di conservazione: e il suo ruolo era stato

a.
La prima campagna pubblicitaria della Nutella del 1964.

nutella

Una delizia da spalmare sul pane

Servita al mattino NUTELLA è la ragione di sostanze più sane che ci regala la natura: zucchero, nocciole, latte più gusto di cacao. Spalmata sul pane NUTELLA è la colazione ideale per adulti e bambini.

BICCHIERI DA 110-160 LIRE + PUNTI EUROREGALO

ricosciuto come fondamentale dalla comunità dei fisici con l'assegnazione del premio Nobel del 1963 a Wigner stesso. Nello schema proposto nel 1961 da Gell-Mann e, in modo indipendente, dal fisico israeliano Yuval Ne'eman, gli adroni potevano essere raggruppati in *multipletti* (ottetti, decupletti, ecc.), sulla base di un gruppo di simmetria denominato matematicamente $SU(3)$ (vd. p. 11). Similmente a come, circa un secolo prima, la costruzione del sistema periodico aveva permesso di individuare un ordine nell'insieme eterogeneo degli elementi chimici, così la simmetria $SU(3)$ di Gell-Mann e Ne'eman metteva ordine nella classificazione degli adroni. E soprattutto, proprio come era accaduto per la chimica, laddove nello schema si presentavano delle caselle vuote, il modello consentiva di prevedere l'esistenza di particelle che avrebbero dovuto esistere, con ben determinate proprietà, per riempire quelle caselle. Una di quelle assenti, il *mesone* η , era stata da poco effettivamente individuata. Per completare lo schema, mancava all'appello un'ulteriore particella, la Ω . La sua scoperta, considerata "una prova stringente della correttezza della teoria", avvenne per mezzo della camera a bolle di Brookhaven proprio nei giorni in cui usciva in edicola il numero di Scientific American sugli adroni.

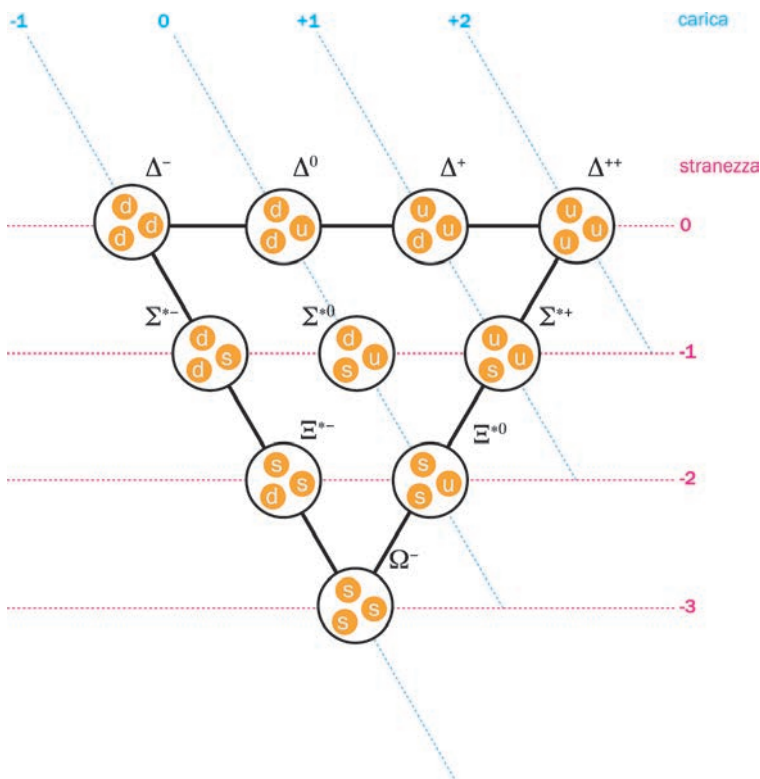
Negli stessi giorni, con un articolo di due pagine su Physics Letters, Gell-Mann pubblicava un'idea su cui aveva riflettuto nei mesi precedenti: i multipletti in cui aveva raggruppato gli adroni conosciuti si ottenevano in modo naturale, se si faceva l'ipotesi che tutte le particelle fossero ricostruibili a partire dalla combinazione di tre entità primarie che Gell-Mann stesso battezzò *quark*, riprendendo un termine dal verso "Three quarks for Muster Mark!", contenuta nell'ultima opera di

James Joyce, *Finnegans Wake*. I tre tipi (detti *sapori*) di quark, che permettevano di ricostruire tutti gli adroni noti all'epoca, sono chiamati (con nomi di fantasia) *up*, *down* e *strange*. Il protone, per esempio, si ottiene combinando due quark up e un quark down; il neutrone, due quark down e un quark up; la particella Ω , tre quark strange.

Un aspetto fortemente problematico dell'ipotesi dei quark era che queste entità avrebbero dovuto avere cariche frazionarie, una proprietà che non era mai stata osservata in natura. Questa difficoltà poteva essere aggirata, considerando gli ipotetici quark non come oggetti reali, ma solo come entità matematiche, e infatti lo stesso Gell-Mann chiudeva il suo articolo affermando che "la ricerca di quark stabili negli acceleratori di energia più elevata ci aiuterà a rassicurarci sulla non esistenza di quark reali".

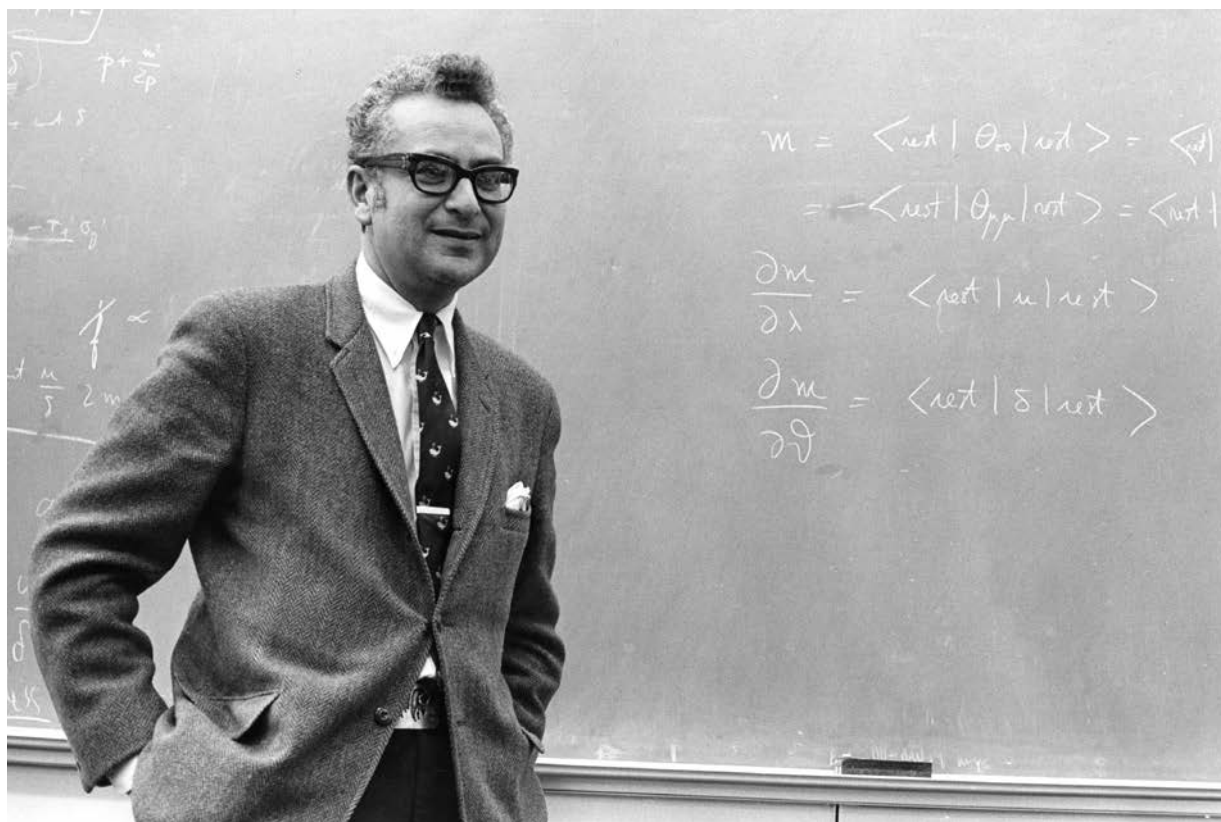
Contemporaneamente, George Zweig, allora giovane ricercatore del Cern, ebbe la stessa idea di Gell-Mann, e la rese pubblica in un rapporto interno del Cern del gennaio 1964. Per Zweig, però, le ipotetiche particelle con carica frazionaria (che aveva denominato *aces*, assi) non erano semplici costrutti formali, ma veri e propri "mattoni fondamentali", oggetti realmente esistenti in natura. Era un'idea talmente ardita che Zweig non riuscì a fare pubblicare il suo lavoro su alcuna rivista.

Le difficoltà incontrate da Zweig erano solo il riflesso delle difficoltà più generali con cui si scontravano, nel 1964, i tentativi di fondare una teoria delle interazioni tra particelle elementari sul modello dell'elettrodinamica quantistica (QED, dall'inglese *Quantum ElectroDynamics*), la teoria quantistica del campo elettromagnetico. Tra i numerosi problemi irrisolti, c'erano in particolare due ostacoli apparentemente



b.

Il decupletto barionico, costituito dalle particelle Δ , Σ^{*} , Ξ^{*} e Ω , quest'ultima scoperta nel 1964. Per ogni particella è indicata la composizione in quark up (u), down (d) e strange (s), mentre la griglia identifica carica e stranezza delle diverse particelle.



insormontabili. Da un lato, per grandezze fisicamente osservabili, i calcoli fornivano valori infiniti (per la QED il problema era stato risolto con successo oltre un decennio prima). Dall'altro, le simmetrie su cui ci si aspettava che fossero basate le teorie delle interazioni fondamentali (le cosiddette *simmetrie di gauge*) richiedevano che le particelle mediatrici delle forze avessero massa nulla. Questa condizione è soddisfatta nella QED, dove il ruolo di mediatore è svolto dal fotone, ma appariva inconciliabile con le proprietà delle interazioni deboli e forti, la cui natura a corto raggio richiedeva la presenza di particelle mediatrici dotate di massa. Una soluzione sembrava quasi impossibile e, per un numero crescente di fisici, neanche più desiderabile.

Il sostenitore più tenace di questo punto di vista era un altro degli autori dell'articolo di Scientific American, Geoffrey Chew. Nello scenario proposto da Chew nessuno degli adroni poteva essere considerato più "elementare" degli altri. Abbandonata l'idea di ricostruire le proprietà del mondo subnucleare a partire dalle relazioni tra pochi mattoni

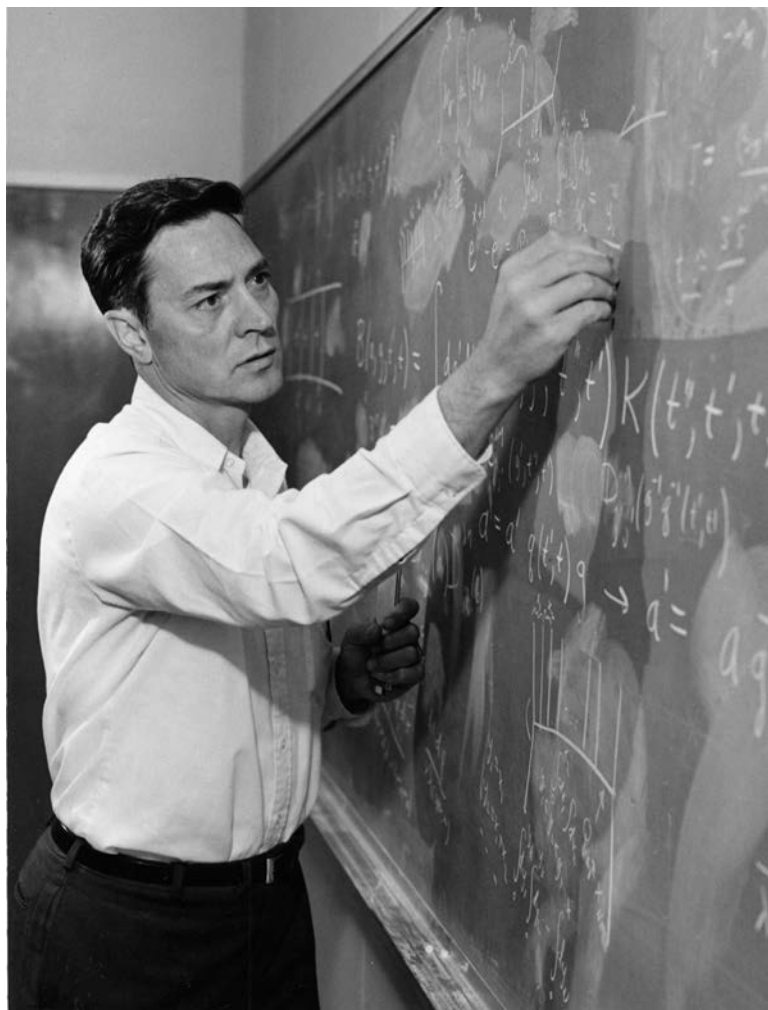
fondamentali, l'obiettivo che ci si proponeva era piuttosto quello di edificare uno schema coerente delle relazioni tra gli adroni, in cui ciascuna particella doveva la propria esistenza all'interazione con le altre particelle, senza alcuna struttura gerarchica, e dove tutti sono sullo stesso piano. Una "democrazia delle particelle" che ben si adattava al terreno di coltura della Berkeley della metà degli anni '60, dove Chew lavorava e dove ben altri movimenti aspiravano a un allargamento della democrazia. È questo il programma di ricerca che domina il panorama della fisica delle particelle nel 1964 e negli anni seguenti. Ancora nel 1970, Chew affermava che "sarebbe una drammatica delusione se nel 1980 tutta la fisica degli adroni potesse essere spiegata in termini di poche entità arbitrarie". Ma, proprio nei mesi precedenti, alcuni esperimenti all'acceleratore di Stanford (Slac), in California, avevano messo in luce la presenza di componenti elementari all'interno del protone, e un decennio dopo, non solo i quark erano riconosciuti come i costituenti elementari degli adroni, ma si disponeva anche di una teoria completa delle loro interazioni.

a.
Murray Gell-Mann in una foto del 1969, anno in cui è stato insignito del premio Nobel per la fisica per "il contributo alle scoperte inerenti la classificazione delle particelle elementari e delle loro interazioni".

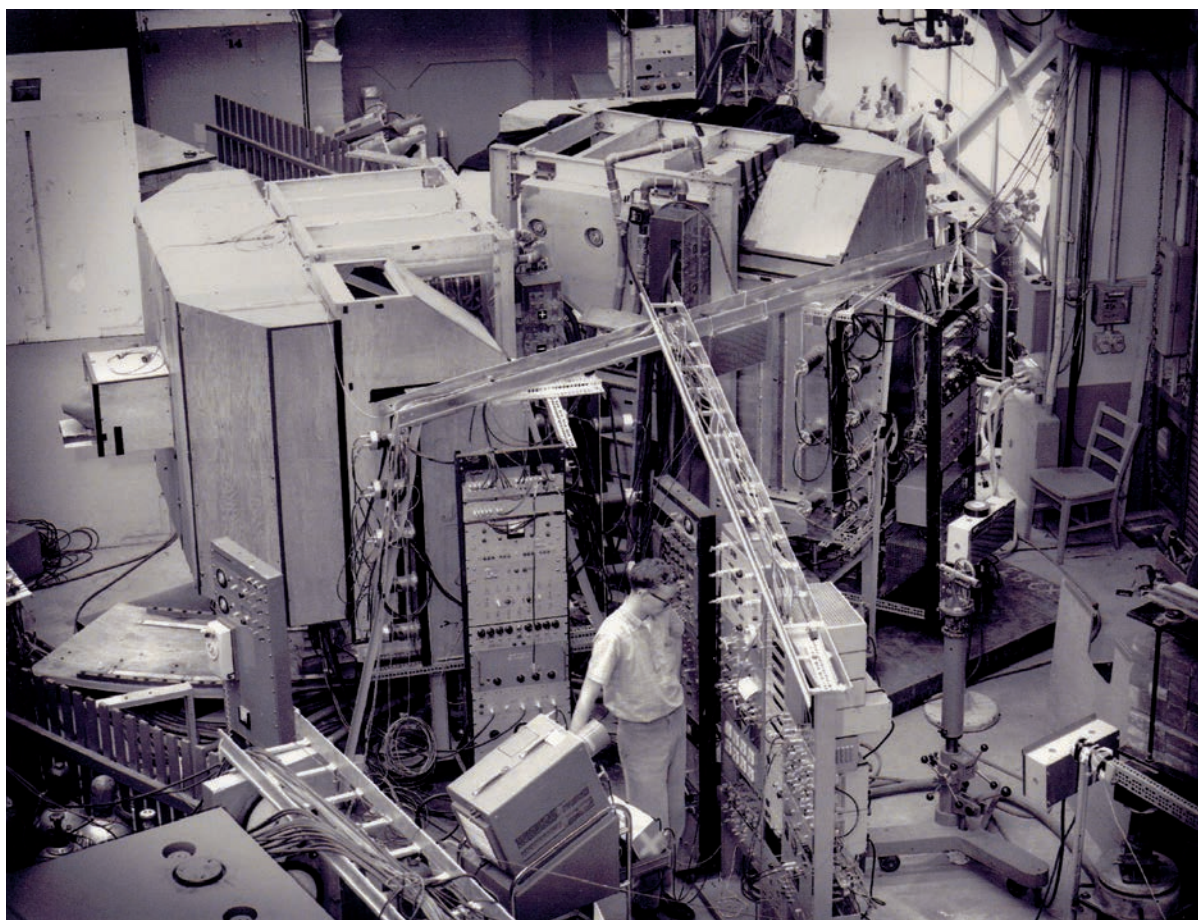
Che la storia successiva abbia poi deluso le aspettative di Chew non deve impedire di riconoscere che, nel 1964, quelle aspettative erano legittime e largamente condivise. E questo aiuta a comprendere perché quelli che, a posteriori, ci appaiono come pezzi fondamentali della sintesi emersa con il modello standard, abbiano suscitato, al momento della loro prima apparizione, entusiasmi moderati, se non addirittura indifferenza.

È quanto è accaduto ad altre due idee apparse per la prima volta nel 1964 senza produrre conseguenze di rilievo, e che si rivelarono invece due fondamentali punti di svolta quando vennero riprese pochi anni più tardi in un contesto modificato. Attratti dalla prospettiva di istituire una simmetria tra la famiglia degli adroni e quella dei leptoni, James Bjorken e Sheldon Glashow avanzarono l'ipotesi dell'esistenza di un quarto quark, che battezzarono *charm*, da aggiungere ai tre quark proposti da Gell-Mann (negli anni Settanta, furono poi introdotti il quinto e il sesto quark, il *top* e il *bottom*). Inoltre, per eliminare alcune difficoltà del modello a quark, fu introdotta più o meno contemporaneamente da Oscar Wallace "Wally" Greenberg,

Moo-Young Han e Yoichiro Nambu un'ulteriore proprietà quantistica dei quark, denominata poi *colore*, che si sarebbe rivelata la chiave giusta per costruire la teoria fondamentale delle interazioni forti, la cromodinamica quantistica (QCD, dall'inglese *Quantum ChromoDynamics*) (vd. p. 18, ndr). Intanto, un risultato sperimentale inatteso agitava il panorama della fisica delle interazioni deboli. Già nel 1957 era stato provato che nelle interazioni deboli era violata quella che sembrava essere una naturale simmetria, detta *di parità*. In termini grossolani, la natura sembrava distinguere tra destra e sinistra. Combinando però la parità P con la simmetria C, che sostituisce le particelle con le corrispondenti antiparticelle, si costruiva la simmetria CP che sembrava rispettata dalla natura. Ma nel giugno del 1964, gli esperimenti condotti dal gruppo di James Cronin e Val Fitch a Brookhaven stabilirono che anche la simmetria CP era, sia pure in piccola misura, violata (vd. p. 33, ndr). Si proponeva nuovamente il problema della compatibilità tra i principi di simmetria richiesti dalle strutture teoriche e la loro violazione nei processi osservati in laboratorio. La domanda al cuore del



d.
Uno degli autori dell'articolo su Scientific American, Geoffrey Chew.



problema era: perché se le leggi generali della natura obbediscono a certe simmetrie, queste non sono rispettate dagli stati fisici particolari che sono effettivamente osservati? Quali sono i meccanismi che provocano la “rottura della simmetria”?

Quest’ultimo aspetto era noto e studiato da tempo dalla fisica della materia, in particolare per spiegare la superconduttività. Uno dei teorici, attivo nell’intersezione tra fisica della materia e fisica delle particelle, era proprio Nambu, cui nell’estate del 1964 fu sottoposto dalla rivista *Physical Review Letters* un breve articolo, in cui si mostrava come il meccanismo detto di *rottura spontanea di simmetria* fosse rilevante per la fisica delle particelle elementari e come questo meccanismo conducesse ad assegnare una massa non nulla ai quanti del campo. Autore dell’articolo era un fisico teorico di Edinburgo, Peter Higgs. Negli stessi giorni la rivista aveva pubblicato un lavoro indipendente di due fisici belgi, Francois Englert e Robert Brout, che esponeva essenzialmente la stessa idea di Higgs. Non apparve subito chiaro, ma l’idea in questione era la risposta a uno dei problemi che affliggevano le teorie di gauge delle interazioni fondamentali, l’origine della massa delle particelle elementari e dei mediatori delle forze (vd. p. 27, ndr), premiata pochi mesi fa, nell’ottobre 2013, con il Nobel conferito a Peter Higgs e Francois Englert.

E mentre la teoria dei campi faticava a dimostrare tutta la potenza che sarebbe emersa nei decenni successivi, altri fisici avevano continuato a scandagliare le implicazioni profonde della meccanica quantistica, una delle due grandi intuizioni degli inizi del 900 alla base della teoria dei campi, assieme alla relatività. La meccanica quantistica aveva implicazioni filosofiche che lasciavano perplessi molti. Già negli anni ’30, insieme a Boris Podolsky e Nathan Rosen, Albert Einstein aveva ideato un esperimento mentale, noto come *paradosso Einstein-Podolsky-Rosen* (*Epr*), che metteva in luce, a loro giudizio, la natura contraddittoria della meccanica quantistica.

e.
Il laboratorio di Brookhaven, dove James Cronin e Val Fitch scoprirono la violazione di CP nel 1964.



f.
Il fisico John Bell che nel 1964
introdusse l'omonima
disuguaglianza.

Bisognava aspettare altri trent'anni di studi teorici perché, sempre nel 1964, John Bell formulasse la disuguaglianza omonima, che avrebbe permesso di dimostrare sperimentalmente, altri 20 anni dopo in modo definitivo, che non c'è nulla di paradossale nella meccanica quantistica. Un'altra affascinante ipotesi ha trovato conferma nel 1964. Sulla base di pochi indizi il fisico americano George Gamov, ultimo di una nutrita schiera di scienziati, aveva teorizzato l'esistenza di un momento iniziale dell'universo: ipotesi affascinante ma priva di una vera conferma sperimentale. Non è raro oggi incontrare bambini delle elementari affermare che "l'universo è nato dal Big Bang". La loro sicurezza sfacciata e cristallina nasce proprio nei primi mesi del 1964, quando i radioastronomi Arno Penzias e Robert Wilson scoprono la *radiazione di fondo cosmico*, interpretata subito come la debole eco del Big Bang da cui tutto era nato 13 miliardi di anni fa (vd. Asimmetrie n. 4 p. 14, ndr). La scoperta del Ω , della violazione CP e la conferma della teoria del Big Bang, sul terreno sperimentale, e l'invenzione dei quark, del charm e del colore e la formulazione del

meccanismo di Higgs, sul piano teorico: con uno sguardo retrospettivo, è facile giustificare l'appellativo di *annus mirabilis* per la fisica delle particelle al 1964. Ma è altrettanto utile ricordare che, per l'appunto, di uno sguardo retrospettivo si tratta: parecchio tempo sarebbe passato prima che i pezzi del puzzle emergessero pienamente dalla grande confusione teorica e sperimentale del momento in cui furono proposti e trovarono il proprio posto in un quadro complessivo coerente del mondo particellare.

Biografia

Giovanni Battimelli è professore associato presso il Dipartimento di Fisica della Sapienza, Università di Roma, dove insegna storia della fisica. Ha fatto ricerca su vari aspetti della storia della fisica dell'Ottocento e Novecento, occupandosi in particolare delle vicende della fisica italiana dall'Unità ad oggi e curando la conservazione degli archivi personali di alcuni dei protagonisti di queste vicende.

[as]

La forza del gruppo.

La fisica fondamentale abbonda di “simmetrie” dai nomi strani: $U(1)$, $SU(2)$, $SU(3)$, ecc. Di che cosa si tratta?

Cominciamo con il dire che una *simmetria* è una proprietà di invarianza delle leggi di natura rispetto a certe trasformazioni, che possono essere *spaziotemporali* (rotazioni, cambiamenti del sistema di riferimento, ecc.) o *interne* (cambiamenti di certe proprietà intrinseche delle particelle, come p. es. la carica elettrica, il colore, il sapore ecc.). Dal punto di vista matematico, un insieme di trasformazioni di simmetria ha la struttura di un *gruppo*, e le sigle che abbiamo citato indicano per l'appunto dei *gruppi di simmetria*.

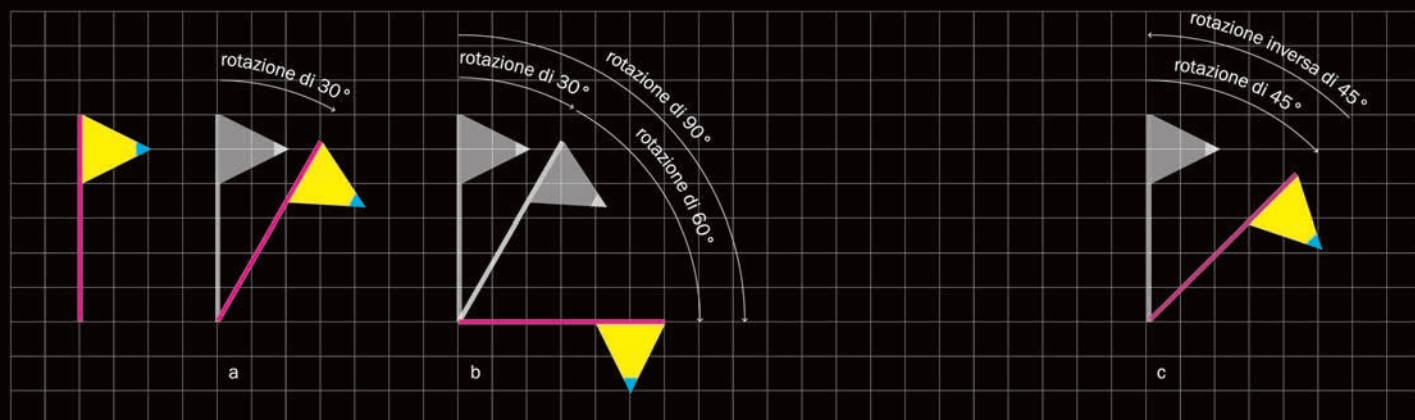
Per illustrare il concetto di gruppo di trasformazioni, consideriamo due rotazioni nel piano. Se effettuiamo di seguito prima l'una e poi l'altra, il risultato finale sarà equivalente a quello di una terza rotazione: in altri termini, componendo due rotazioni si ottiene ancora una rotazione. Questa proprietà dell'insieme delle rotazioni è chiamata *chiusura*. Ad esempio, se componiamo

una rotazione di 30° con una rotazione di 60° , otteniamo una rotazione di $(30^\circ + 60^\circ) = 90^\circ$ (vd. fig. a e b).

Ogni rotazione, poi, ammette una rotazione *inversa*, cioè una rotazione che, per così dire, riporta le cose al punto di partenza, annullando l'effetto della prima. Data una rotazione in senso orario di 45° , la rotazione inversa sarà una rotazione in senso antiorario di 45° (vd. fig. c). Effettuare prima l'una e poi l'altra equivale a non effettuare alcuna rotazione o, come si dice, a effettuare una rotazione *identica*. L'*identità* è una trasformazione particolare, che non trasforma nulla (cioè lascia tutto com'è). Questo discorso può essere esteso a qualunque tipo di trasformazione. Se le trasformazioni di un sistema godono delle proprietà che abbiamo illustrato – chiusura, esistenza dell'identità ed esistenza dell'inverso – si dice che quelle trasformazioni formano un *gruppo*. Tutte le trasformazioni di simmetria della fisica formano dei gruppi. In particolare, le simmetrie interne sono associate in genere a gruppi che in gergo matematico

sono chiamati “unitari” o “speciali unitari” e indicati con le lettere U e SU seguite da un numero in parentesi, che è legato al numero di parametri necessari a descrivere le trasformazioni del gruppo. La simmetria di Gell-Mann, per esempio, è di tipo $SU(3)$ ed è chiamata anche *simmetria di sapore*, perché è una simmetria approssimata delle interazioni forti rispetto al cambiamento del *sapore* (cioè del tipo) dei quark leggeri: up, down o strange.

Le simmetrie unitarie più importanti sono le *simmetrie di gauge* (vd. Asimmetrie n. 11 p. 4), quelle alla base delle teorie fondamentali delle forze. La forza elettromagnetica è basata su una simmetria di gauge di tipo $U(1)$, legata alla carica elettrica, la forza debole su una simmetria di gauge $SU(2)$, che è rotta spontaneamente dal meccanismo di Higgs. La forza forte possiede una simmetria di gauge esatta, matematicamente di tipo $SU(3)$ come la simmetria di Gell-Mann, ma legata alla carica di colore dei quark e perciò detta *simmetria di colore*. [Vincenzo Barone]



[as]

Ieri, oggi, domani.

A uno sguardo superficiale la scienza appare progredire a salti: lunghi periodi di calma intervallati da improvvise scoperte o invenzioni. Un'analisi più attenta rivela un flusso continuo di idee, intuizioni, studi, misure che sono la pietra angolare della conoscenza scientifica stessa e l'ambiente favorevole in cui il

PRIMA DEL 1964

- **simmetria di isospin** (Heisenberg, 1932)
- **stranezza** (Gell-Mann, Nishijima, 1955)
- **SU(3)** (Gell-Mann, Ne'eman, 1961)
- **angolo di Cabibbo** (1963)

- **modello di Nambu e Jona-Lasinio** (1960)
- **teorema di Goldstone** (1961)
- **teorie di gauge** (Yang e Mills, 1954)

- **puzzle theta-tau** (anni 50)
- **violazione di parità** (Lee e Yang, 1956)
- **esperimento di Madame Wu** (1957)

- **espansione dell'universo** (Friedmann, Lemaitre, 1924-27)
- **legge di Hubble** (1929)
- **idea del Big Bang** (Gamow, Alpher, Herman 1948)

- **dibattito Bohr-Einstein** (1927)
- **articolo di Einstein, Podolsky e Rosen** (1935)

Mandela viene condannato all'ergastolo



intervento degli Usa in Vietnam



esce "A hard day's night" dei Beatles



prima bomba atomica cinese



esce nelle sale "Il dottor Stranamore" di Kubrick



a

QUARK,
CHARM,
COLORE



b

ROTTURA SPONTANEA DELLE
SIMMETRIE DI GAUGE

1964



c

VIOLAZIONE DI CP



d

RADIAZIONE
COSMICA DI FONDO

DISUGUAGLIANZA
DI BELL



e



viene lanciato il San Marco, primo satellite italiano



muore Palmiro Togliatti



completata l'Autostrada del Sole



primo vasetto di Nutella



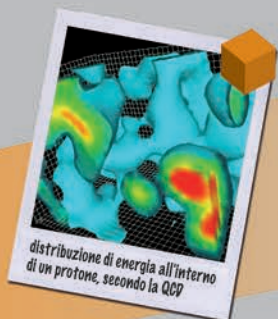
Leone gira il film "Per un pugno di dollari"



colpo di genio può manifestarsi. Per la fisica il 1964 sembrava proprio uno di quei periodi di calma piatta. In realtà la prospettiva offerta dai 50 anni di distanza rende evidente che il 1964 è stato l'anno in cui da fermenti sedimentati nei decenni precedenti sono germogliate fondamentali scoperte scientifiche, che avrebbero manifestato tutta la loro rilevanza solo successivamente, anche a distanza di decenni.

- a. Robert Brout (sinistra), Francois Englert, Peter Higgs (destra)
- b. Murray Gell-Mann (sinistra), Sheldon Lee Glashow (destra)
- c. James Cronin (sinistra), Val Fitch (destra)
- d. Robert Wilson (sinistra), Arno Penzias (destra)
- e. John Bell

DOPO IL 1964



distribuzione di energia all'interno di un protone, secondo la QCD

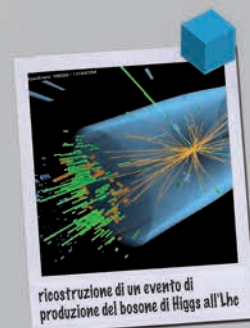
diffusione profondamente anelastica e modello a partoni (1968-70)
cromodinamica quantistica (1972-73)
equazioni di evoluzione dei quark (Altarelli e Parisi, 1977)



Leon Lederman, lo scopritore della prima particella contenente il quark bottom

teoria GIM (1970)
scoperta della J/Psi (1974)
scoperta del bottom (1977) e del top (1994)

modello standard (Glashow, Weinberg, Salam, 1967-68)
scoperta del bosone di Higgs (2012)



ricostruzione di un evento di produzione del bosone di Higgs all'Lhc



rappresentazione artistica della differenza tra materia e antimateria

asimmetria materia-antimateria (Sakharov, 1967)
meccanismo di Kobayashi e Maskawa (1973)
violazione di CP nei mesoni B (2001)

misura della "piattezza" dell'universo (2000)
mappe della radiazione di fondo (COBE 1991, WMAP 2003, Planck 2013)



immagine dell'universo quando aveva solo 380.000 anni: dai dati raccolti dal telescopio Planck



l'ottica quantistica ha anche aperto la strada al teletrasporto delle informazioni quantistiche

esperimenti di Aspect (1982)
teletrasporto quantistico (1997)

I semi delle cose

Storia e attualità dei quark

di Stefano Forte



a.
Il fuoristrada di Gell-Mann
targato "QUARKS".

Introdotti nel 1964 da Murray Gell-Mann, i quark sono particelle alquanto peculiari, che non possono essere osservate direttamente, ma di cui si hanno solo indizi indiretti. Oggi sappiamo che, assieme ai leptoni, essi rappresentano i costituenti elementari della materia. Tuttavia, i quark come sono concepiti dalle moderne teorie delle interazioni fondamentali sono oggetti piuttosto diversi dai quark di Gell-Mann. Ma facciamo un passo indietro.

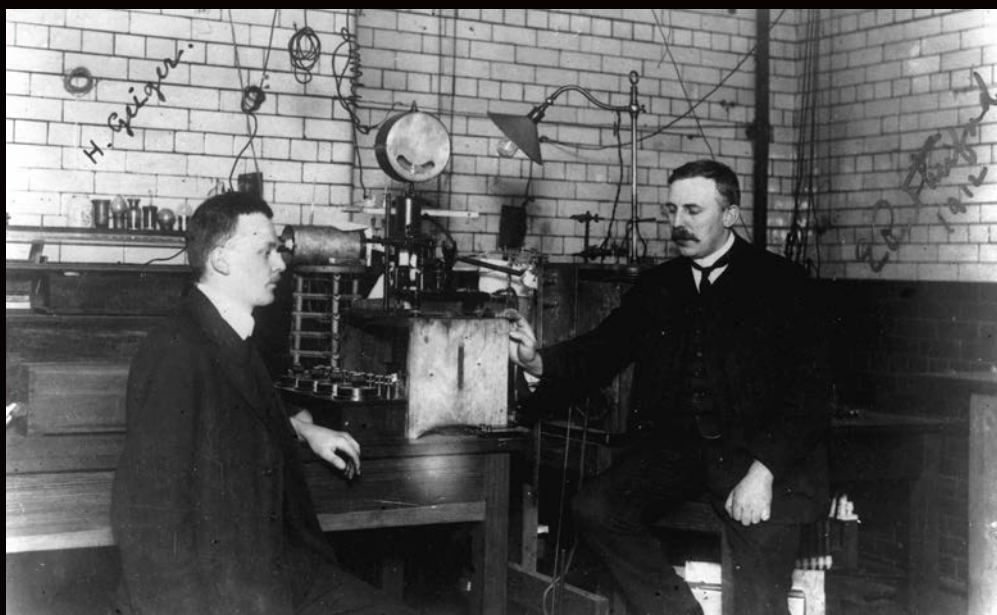
Per dare una risposta al problema della proliferazione delle particelle fortemente interagenti (gli adroni), nel 1961 Gell-Mann suggerì che l'interazione forte potesse avere una

simmetria descritta matematicamente dal gruppo $SU(3)$ (vd. p. 11, ndr), cioè che restasse invariata sotto le trasformazioni di questo gruppo. Il modello di Gell-Mann riuscì a fare ordine nella congerie degli adroni noti all'epoca (molte decine) e fu in grado di descrivere con successo la loro fenomenologia. Ma perché la simmetria è proprio $SU(3)$? Una possibile risposta è che gli adroni non sono particelle elementari, ma stati legati di oggetti più piccoli, i quark appunto, e delle loro antiparticelle, gli antiquark. Gell-Mann ipotizzò tre tipi, o "sapori", di quark (up, down e strange), e la simmetria $SU(3)$ è quella che scambia i sapori. Le regolarità osservate nelle masse degli adroni e nei

[as] approfondimento

L'eredità di Rutherford

1.
Ernest Rutherford (a destra) e Hans Geiger (a sinistra) nel celebre laboratorio nell'Università di Manchester, dove nel 1909 fu scoperto il nucleo atomico.



Gli esperimenti che hanno rivelato la presenza di costituenti elementari all'interno del protone rientrano in un modello di esplorazione della materia che ha una lunghissima storia ed è basato su un'idea molto semplice: studiare la struttura di un sistema sparandogli contro delle particelle e osservando come queste vengono diffuse.

I tre elementi base di questa classe di esperimenti sono un fascio di particelle (che fungono da proiettili), un bersaglio e un rivelatore. Il bersaglio è costituito dal sistema che si intende studiare (atomi, nuclei, protoni, ecc.). Le particelle-proiettili sono elementari (cioè prive di struttura interna, come gli elettroni, i muoni o i neutrini) o si comportano come tali. Il rivelatore è posto dietro e attorno al bersaglio e segnala l'arrivo delle particelle diffuse, contandole ed effettuando una serie di misure (identificazione del tipo di particella, misura dell'energia, ecc.).

Fu con un apparato di questo genere (che stava tutto

su un tavolo da laboratorio) che nel 1909 Hans Wilhelm Geiger ed Ernest Marsden, collaboratori di Ernest Rutherford, scoprirono il nucleo atomico. I due fisici osservarono che, inviando un fascio di particelle alfa (che oggi sappiamo essere costituite da due protoni e due neutroni, ma che nell'urto rimanevano intatte ed erano quindi assimilabili a corpuscoli elementari) su lamine di vari metalli, un certo numero di particelle subiva una notevole deflessione. Persino un sottilissimo foglio d'oro, dello spessore di mezzo millesimo di millimetro, era in grado di deviare alcune particelle di più di 90°. Rutherford capì che ciò era dovuto al fatto che le particelle urtavano contro un oggetto molto piccolo posto al centro dell'atomo – il nucleo – che concentrava in sé quasi tutta la massa atomica (vd. Asimmetrie n.9 p. 6, ndr).

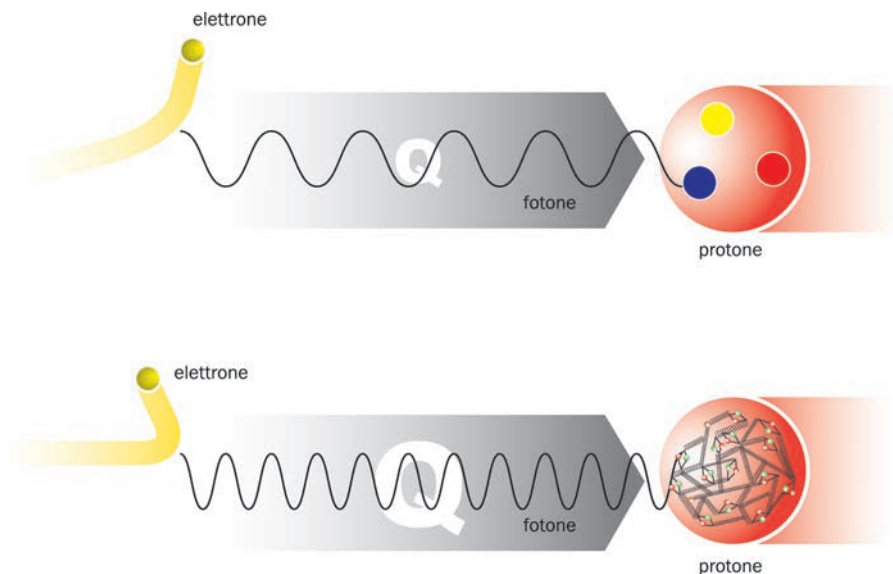
I primi esperimenti di diffusione di elettroni su atomi furono compiuti negli anni trenta. Da allora questo

tipo di esperimenti ha permesso di esplorare anche la struttura dei nuclei e dei nucleoni (protoni e neutroni). Negli anni cinquanta, Robert Hofstadter scoprì in questo modo che i nucleoni non sono oggetti puntiformi, ma sferette composte di raggio pari a circa un fermi (10^{-15} metri). Con elettroni di più alta energia, alla fine degli anni sessanta, i fisici dello Slac, in California, rivelarono l'esistenza dei quark all'interno del protone. Il processo studiato allo Slac, e in seguito con precisione crescente al Cern di Ginevra e all'acceleratore Hera di Amburgo, è la cosiddetta *diffusione profondamente anelastica*, in cui il protone bersaglio si frammenta in una miriade di particelle che non vengono osservate. Le sole particelle osservate sono gli elettroni diffusi e, come negli esperimenti di Geiger e Marsden, il cospicuo numero di elettroni deflessi a grandi angoli segnala la presenza di corpuscoli più piccoli all'interno del protone: i quark. [Vincenzo Barone]

loro processi sono conseguenza del fatto che l'interazione forte è invariante (del tutto o in parte) sotto questo scambio. Ma i quark esistono davvero? Se sì, dovrebbero essere relativamente facili da individuare, perché hanno una carica elettrica pari a multipli di un terzo della carica dell'elettrone, mentre tutte le particelle note hanno carica pari a multipli interi della carica dell'elettrone.

Eppure, i quark liberi sono stati cercati dappertutto, ma non sono mai stati trovati (vd. p. 21, ndr). D'altra parte, a partire dalla seconda metà degli anni '60, la presenza di costituenti puntiformi all'interno dei protoni fu rivelata da una serie di esperimenti di diffusione profondamente anelastica (in inglese, *deep-inelastic scattering*) (vd. approfondimento). In

questi esperimenti, l'urto di un elettrone di alta energia su un protone produce uno stato finale che contiene un gran numero di particelle che non vengono rivelate. Sperimentalmente si studia solo la distribuzione angolare degli elettroni deflessi. Ci si sarebbe aspettati, immaginando il protone come una sferetta uniformemente carica, che la probabilità di osservare questi elettroni



b. Quando una particella carica come l'eletttrone interagisce con un protone, scambia con esso un fotone. È questo che "sonda" il bersaglio. Il parametro importante nel processo è una combinazione dell'energia e della quantità di moto del fotone chiamata Q . Maggiore è Q , maggiore è la risoluzione con cui il fotone-sonda "vede" il protone. A piccolissimi Q , il protone appare costituito da tre quark di Gell-Mann; a grandi Q , appare invece costituito da un gran numero di quark, antiquark e gluoni puntiformi. L'"evoluzione" in Q della struttura del protone è predetta dalla teoria fondamentale dell'interazione forte, la cromodinamica quantistica (QCD), che trova proprio nella diffusione profondamente anelastica uno dei suoi test di maggior successo.

diminuisse molto rapidamente al crescere del loro angolo di deflessione. Invece, si trovò che, per angoli sufficientemente grandi ed energie sufficientemente alte, essa diventava circa costante.

Nel 1968 Feynman osservò che ciò poteva essere spiegato supponendo che l'urto avvenisse tra l'eletttrone e costituenti elementari (cioè senza struttura interna) e quasi liberi, ossia tali da non accorgersi di essere all'interno di un protone. È stato naturale pensare che questi costituenti, che Feynman battezzò *partoni*, potessero essere identificati con i quark. In effetti, da questa identificazione seguirono diverse predizioni sperimentali, che furono in seguito verificate con crescente precisione.

Questo porta a una conclusione paradossale. Da un lato, è impossibile osservare i quark liberi, il che suggerisce che, se esistono, sono così fortemente legati che l'energia necessaria per spezzare un protone nei suoi costituenti è infinita. Dall'altro, vi sono evidenze della presenza di quark all'interno del protone, i quali però si comportano come quasi liberi, ossia molto debolmente legati.

Questa apparente contraddizione è risolta dalla cromodinamica quantistica (QCD, *Quantum Chromodynamics*), la teoria delle interazioni forti, in cui i quark (e gli antiquark) interagiscono con le particelle mediatrici della interazione forte, i *gluoni*, analogamente a

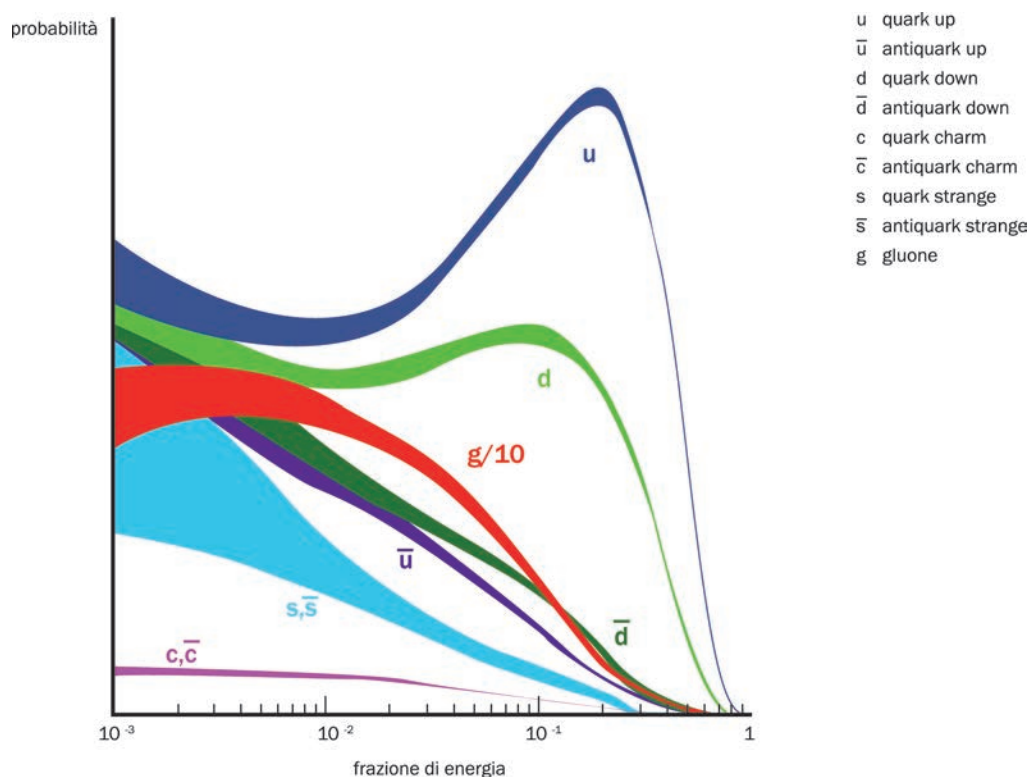
come nell'elettromagnetismo gli elettroni interagiscono con la luce, cioè con i fotoni (particelle mediatrici dell'interazione elettromagnetica). Una delle caratteristiche della QCD, infatti, è che l'interazione tra quark e gluoni, pur avendo la stessa forma a tutte le distanze, si attenua al diminuire della distanza a cui viene sondata (o, equivalentemente, all'aumentare dell'energia) e tende ad annullarsi a distanze infinitamente piccole, cioè a energie infinitamente elevate (un fenomeno noto come *libertà asintotica*). Ecco perché negli urti di elettroni di alta energia i quark appaiono come oggetti molto poco interagenti, pressoché liberi.

In una teoria quantistica dei campi come la QCD anche le entità fisiche cambiano al variare della risoluzione con cui vengono osservate. Questo vuol dire che un oggetto che, osservato con bassa risoluzione (ossia a bassa energia), può apparire come un singolo quark, visto con una risoluzione più alta (ossia ad alta energia) si rivela essere in realtà un coacervo di molti quark, antiquark e gluoni. Ciò permette di chiarire il vero significato dei quark di Gell-Mann. Questi sono solo indirettamente legati ai quark puntiformi della QCD: si tratta infatti di oggetti compositi. Hanno le stesse cariche dei quark della QCD, ma le interazioni tra di essi sono descritte da una diversa teoria, che si ottiene dalla QCD nel limite di basse energie, cioè quando il protone viene

“sondato” con bassa risoluzione. Il protone è fatto da tre quark di Gell-Mann, che in esperimenti di alta energia si rivelano essere composti da infiniti quark, antiquark e gluoni: sono questi, in ultima analisi, i mattoni fondamentali della materia.

Nel corso degli ultimi vent’anni la QCD nel regime delle alte energie ha portato a predizioni sempre più precise, che sono state verificate sperimentalmente con grande accuratezza. C’è questa teoria alla base degli esperimenti che hanno recentemente portato alla scoperta del bosone di Higgs nelle collisioni tra protoni nell’acceleratore Lhc del Cern. Infatti, una descrizione accurata della sottostruttura del protone è un ingrediente indispensabile per ottenere predizioni per

qualunque processo in Lhc. Questa informazione è codificata nelle distribuzioni partoniche, che forniscono la probabilità di trovare all’interno di un protone i vari tipi di quark e antiquark, e i gluoni (vd. fig. c). Dal punto di vista della QCD, la simmetria SU(3) di Gell-Mann, cioè l’invarianza rispetto al cambiamento di sapore dei quark up, down e strange, risulta essere una proprietà accidentale, dovuta al fatto che questi quark sono tutti e tre molto più leggeri del protone. La simmetria fondamentale della QCD, quella che determina le leggi dell’interazione forte, è un’altra simmetria di tipo SU(3), ma riguardante una diversa proprietà dei quark, anch’essa immaginata nel 1964: il colore (vd. p. 18, ndr).



c.
Le funzioni di distribuzione partoniche del protone per $Q^2 = 4 \text{ GeV}^2$ determinate dalla collaborazione Neural Network Parton Distribution Functions. Ciascuna banda corrisponde a un tipo di costituente distinto (partone) del protone (quark, antiquark o gluone) e fornisce la probabilità che in una collisione di alta energia esso porti una frazione dell’energia del protone da cui è estratto, indicata sull’asse orizzontale. La larghezza delle bande indica l’incertezza teorica. Per comodità di rappresentazione la banda dei gluoni è ridotta di un fattore dieci.

Biografia

Stefano Forte ha conseguito il dottorato di ricerca al Massachusetts Institute of Technology (Mit) e ha successivamente lavorato a Parigi e al Cern. È stato ricercatore dell’Infn a Torino e a Roma ed è attualmente professore ordinario di fisica teorica all’Università di Milano. Si occupa principalmente di teoria dell’interazione forte e coordina la collaborazione Nnpdf (Neural Network Parton Distribution Functions).

A tinte forti

Dal colore alla QCD

di Paolo Nason

a.

Il fisico statunitense George Zweig, che nel 1964, come giovane ricercatore al Cern, ebbe la stessa idea di Gell-Mann sui quark, ma li denominò *aces* (assi). Ha studiato fisica delle particelle con Richard Feynman. Successivamente si interessò di neurobiologia e trascorse diversi anni come ricercatore al Los Alamos National Laboratory e al Mit (Massachusetts Institute of Technology). Nel 2004 ha abbandonato la carriera di scienziato per andare a lavorare nel settore finanziario.

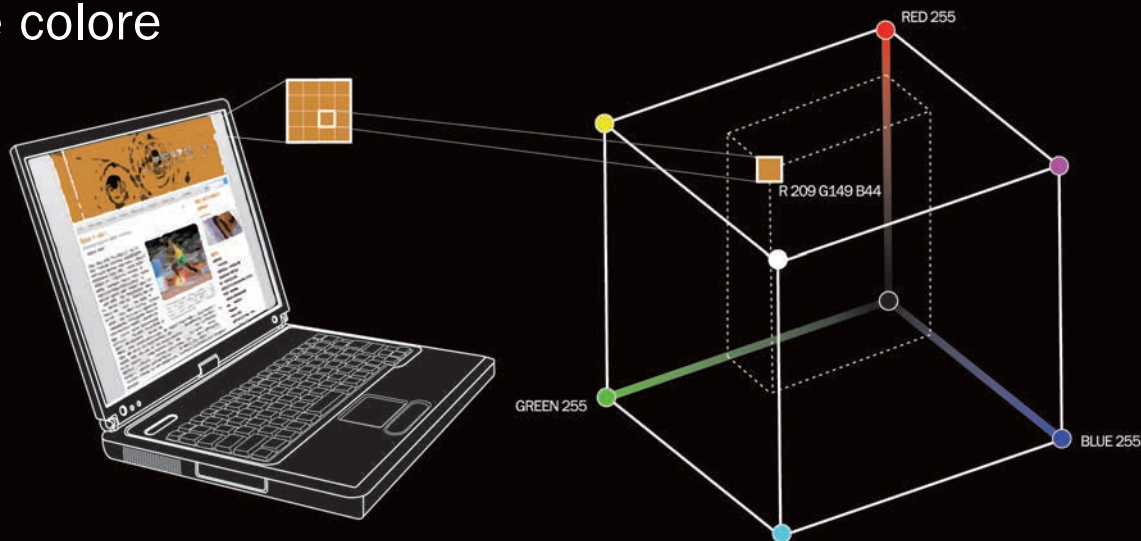


Nel 1964, poco dopo che fu postulata l'esistenza dei quark da Gell-Mann e Zweig, Wally Greenberg avanzò l'ipotesi che i quark possedessero un'ulteriore proprietà nascosta che poteva assumere tre valori distinti. In altre parole, il numero di quark nella teoria di Gell-Mann e Zweig doveva essere triplicato. Dovevano esistere perciò tre quark distinti di tipo up, tre di tipo down e tre di tipo strange. Mentre i quark di tipo up e down differiscono tra di loro per la carica elettrica, e lo strange differisce dall'up e dal down per la massa e la *stranezza* (vd. Asimmetrie n. 11 p. 29, ndr), nessuna ulteriore differenza fisica doveva essere associata a questa nuova proprietà. La nuova proprietà fu chiamata "colore" (in quanto esistono tre colori primari). È meglio chiarire però che questo "colore" non ha niente a che vedere con la nostra percezione fisiologica del

colore. Al posto di blu, verde e rosso, avremmo potuto usare un indice numerico, ed è infatti questo che appare nelle equazioni che governano la dinamica dei quark. La tendenza a utilizzare nomi bizzarri e poco appropriati nella fisica delle particelle elementari è illustrata (forse in modo eccessivamente brutale) da Richard Feynman, che scrive: "Quegli idioti dei fisici, ormai incapaci di farsi venire in mente una bella parola greca, hanno chiamato questo tipo di polarizzazione con l'infelice parola 'colore', che non ha niente a che vedere con il colore di senso comune".

La necessità del colore è bene esemplificata dall'esistenza della Δ^{++} (vd. fig. b a p. 6, ndr), una particella costituita da tre quark di tipo up. I quark, come gli elettroni, obbediscono al *principio di esclusione di Pauli*, che sancisce che non vi

Tris e colore



Nonostante l'aspro giudizio di Feynman, una certa analogia tra il colore dei quark e il colore di senso comune c'è.

Se è vero infatti che questa proprietà dei quark – detta più correttamente *carica di colore* – non ha nulla a che vedere con i colori che percepiamo con i nostri occhi (luce di diverse lunghezze d'onda), le regole matematiche con cui i colori si sommano sono molto simili a quelle con cui si accoppiano i quark.

Con soli tre colori fondamentali, rosso, verde e blu (in inglese la terna *red, green e blue*, RGB) possiamo “costruire” tutti i colori, basta sommarli con un'opportuna combinazione. Funziona così lo schermo del computer: assegnando il valore zero a tutti e tre i colori (0,0,0) otteniamo il nero, assegnando il valore massimo permesso (M_R, M_G, M_B) otteniamo il bianco e, ad esempio, il viola si ottiene con la combinazione ($M_B, 0, M_R$).

Le particelle adroniche, cioè quelle fatte di quark, non possiedono una carica complessiva di colore. Semplificando la matematica dei colori quantistici – che è molto più complessa – possiamo descrivere i barioni come formati da tre quark di colore diverso. I mesoni, invece, possiamo immaginarli come coppie formate da un quark di un colore e un antiquark che ha colore

complementare, cioè quello che neutralizza il corrispondente colore primario. Per definizione, nei colori ordinari il complementare del rosso è il ciano, del verde il magenta e del blu il giallo. Anche i colori complementari formano una terna, CMY (*cyan, magenta, yellow*), molto usata nella stampa su carta. Ma attenzione, in questo caso la sovrapposizione dei colori genera il nero!

Questa analogia ci permette di fare ancora un passo in più: possiamo descrivere l'antiprotone e l'antineutrone come formati da tre antiquark che portano altrettanti anticolori.

La matematica dei colori e degli anticolori permetterebbe di formare sistemi ancora più complessi come il *tetraquark* (due quark e due antiquark), forse osservato di recente (vd. p. 26, ndr), e il *pentaquark* (quattro quark e un antiquark), finora mai osservato. [Giorgio Riccobene]

1.

Più bit ha a disposizione il computer per “sfumare” ognuno dei tre colori di base, più colori si possono costruire: con 5 bit per colore, cioè 32 sfumature di ogni colore di base, possiamo creare circa 32.000 combinazioni. Con 8 bit per colore, invece, cioè 256 sfumature di ogni colore di base, possiamo creare circa 16 milioni di combinazioni.

possono essere due quark nello stesso stato. Nella Δ^{++} anche la proprietà dello *spin* è identica per i tre quark, e ciò porterebbe a pensare che vi debba essere una violazione del principio di Pauli. Ammettendo invece l'esistenza del colore, si può assumere che i tre quark up abbiano colori diversi tra loro, rispettando così il principio di Pauli.

Dal fatto che differenze di colore non implicano differenze di altre proprietà fisiche, segue che esiste un'invarianza delle leggi fisiche sotto una permutazione del colore. Nel mondo microscopico, tuttavia, tale invarianza risulta più ampia e complessa. La meccanica quantistica ci insegna infatti che non solo è possibile che un sistema abbia valori definiti di una certa grandezza, ma che è anche possibile che il sistema sia in una sovrapposizione di stati con valori diversi di questa grandezza, con ciascuna componente avente un peso diverso. Si può ricorrere all'analogia con un punto dello spazio, che è caratterizzato, in coordinate cartesiane, dalle sue componenti x , y e z . Analogamente lo stato di colore di un quark è caratterizzato dalle sue componenti di colore blu, verde e

rosso. Le leggi fisiche sono invarianti, oltre che sotto una permutazione del colore, anche sotto vere e proprie rotazioni nello spazio dei colori (le trasformazioni del gruppo SU(3) di colore), analoghe alle rotazioni spaziali del nostro esempio. L'introduzione del colore deve essere accompagnata da una considerevole restrizione degli stati ammissibili. Se così non fosse, per esempio, il pione positivo, una particella composta da un quark up e un antiquark down, dovrebbe essere presente in nove repliche, corrispondenti alle nove possibili scelte per il colore del quark e dell'antiquark. Si postulò quindi che solo gli stati invarianti sotto le rotazioni del colore siano possibili. Utilizzando questa restrizione si arriva a giustificare l'esistenza di tutti gli adroni (le particelle soggette a interazioni forti) effettivamente osservati, senza introdurne altri. In particolare, questa restrizione vieta l'esistenza di quark liberi che, sebbene attivamente cercati, non sono mai stati rivelati (vd. p. 21, ndr). Inizialmente, i fisici erano incerti se considerare i quark come vere e proprie particelle, o se considerarli invece come un artificio matematico. Successivi sviluppi ci hanno convinto,

Un rapporto cruciale

1.

Misure (punti arancioni con i loro errori sperimentali) del rapporto R per diverse energie. Per energie inferiori alla soglia di produzione delle particelle J/ψ e della Ψ' , i quark prodotti sono solo tre (up, down e strange) e il valore atteso per R è 2 (linea continua azzurra). Al di sopra di questa soglia viene prodotto anche il quark charm e R vale $10/3$ (linea continua verde). Se non si tenesse conto del colore, i risultati teorici sarebbero inferiori di un fattore 3 (linee tratteggiate).



Un'osservazione che conferma brillantemente l'esistenza dei quark e del colore è la misura di R , il rapporto tra la probabilità di produzione di adroni e la probabilità di produzione di muoni in esperimenti di collisione di elettroni e positroni ad alte energie. I muoni sono particelle in tutto simili agli elettroni, che differiscono da questi solo perché più pesanti, cioè dotati di una massa circa 200 volte maggiore di quella degli elettroni. Per quanto riguarda la produzione nelle collisioni elettrone-positrone, essi differiscono dai quark solo nel fatto che questi ultimi hanno carica elettrica frazionaria e portano il colore. Se non fosse per il colore, il valore di R dovrebbe essere uguale alla somma dei quadrati delle cariche

elettriche del quark. L'esistenza delle tre repliche di colore porta a un ulteriore fattore 3 nel valore di R , ma porta anche a una correzione dovuta alle interazioni forti che agiscono tra i quark. Ma la meccanica quantistica ci insegna che lo stato di una particella elementare è caratterizzato da un'onda, con una lunghezza d'onda tanto più piccola quanto più alta è la sua energia. Per energie molto al di sopra del GeV (10^9 elettronvolt), la lunghezza d'onda delle particelle è molto più piccola di un fermi. Quindi le interazioni forti si indeboliscono e la "correzione forte" svanisce. Ne segue che, nel limite delle alte energie, il valore di R è proprio dato da tre volte la somma dei quadrati delle cariche dei quark prodotti.

senza ombra di dubbio, che i quark sono particelle esattamente come lo sono gli elettroni. Sappiamo inoltre che, a distanze inferiori al fermi (pari a 10^{-15} metri), le interazioni forti si indeboliscono, e i quark si comportano come se fossero liberi (vd. p. 14, ndr).

Oggi abbiamo una teoria completa delle interazioni forti, nota come cromodinamica quantistica (QCD), con le interazioni forti determinate dalle cariche di colore (come le interazioni elettromagnetiche sono determinate dalle cariche elettriche). La neutralità in colore corrisponde all'invarianza di un sistema sotto rotazioni di colore. Si può dimostrare che l'intensità dell'interazione forte descritta dalla QCD diminuisce a piccole distanze e aumenta a grandi distanze. Perciò, è possibile separare a grandi distanze solo particelle prive di carica di colore. La piccola intensità delle interazioni della QCD a piccole distanze (e quindi ad alte energie) rende la teoria particolarmente trattabile in questi regimi, per cui siamo in grado di calcolare con precisione diversi processi ad alte energie, come, ad esempio, quelli che hanno luogo nelle collisioni tra protoni in Lhc. I calcoli della QCD sono stati essenziali per la progettazione degli esperimenti di Lhc e sono oggi quotidianamente utilizzati nell'analisi dei dati.

Biografia

Paolo Nason si è laureato in fisica all'Università Statale di Milano e ha conseguito il dottorato negli Stati Uniti, all'Università di Stanford. Ha lavorato in diverse istituzioni all'estero: la Columbia University, il Brookhaven National Laboratory, il Politecnico di Zurigo e il Cern. Attualmente è dirigente di ricerca dell'Infn nella sezione di Milano Bicocca.

Link sul web

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

[as] radici

Libertà impossibile.

di Francesca Scianitti

La caccia ai quark liberi ha inizio con l'idea stessa di quark. Fu l'ideatore dei quark, Murray Gell-Mann, a proporre per primo di verificare l'ipotesi secondo cui non esisterebbero quark isolati, non associati ad altri quark, cercando alle più alte energie prodotte dai grandi acceleratori. I primi esperimenti portano la data del 1964 e furono compiuti al protosincrotrone del Cern e all'acceleratore Ags del Brookhaven National Laboratory, che, lavorando alle alte energie dell'epoca (centinaia di volte inferiori a quelle ottenute oggi da Lhc), permettevano di rivelare nuove particelle in una camera a bolle (vd. *Asimmetrie* n. 15 p. 48, ndr). I risultati, come Gell-Mann stesso si aspettava, furono negativi. Da allora, gli scienziati non hanno mai smesso di cercare i quark liberi, nonostante nessuno si aspetti davvero di trovarli. Sembra che a rendere appetitosa la sfida sia proprio quel pregiudizio iniziale: e se invece esistessero, da qualche parte, nascosti in un luogo diverso da quello in cui si è cercato? Componenti della maggior parte delle particelle, e quindi dei nuclei degli atomi, i quark hanno cariche elettriche pari a un terzo o a due terzi di quella dell'elettrone. Se esistessero in forma libera, cioè slegati da altri quark, si dovrebbero poter misurare cariche frazionarie di questo valore, ma fino ad oggi nessun esperimento ha mai osservato cariche frazionarie: i quark sembrano presentarsi sempre in associazione con altri quark (o antiquark), confinati in stati legati a gruppi di due o di tre, dando luogo a cariche intere. Concepire un esperimento per trovare quark liberi è quindi un'impresa coraggiosa, anche perché le aspettative degli scienziati possono influenzare l'analisi dei dati e il loro risultato. Lo scenario non è quindi molto incoraggiante e forse è questo a rendere la sfida ancora più eccitante.



a.
Al centro della foto, Murray Gell-Mann riceve il Research Corporation Award nel 1969.



L'esperimento più famoso sulla ricerca dei quark liberi è certamente quello che William Fairbank e i suoi colleghi della Stanford University condussero nel 1977. La fama dell'esperimento di Fairbank si deve al fatto che è stato l'unico nella storia ad avere riportato risultati positivi sull'esistenza di cariche frazionarie, che si sarebbero potute associare naturalmente ai quark.

L'esperimento non utilizzava la tecnologia dei grandi acceleratori, prendeva spunto piuttosto dal lavoro del fisico Robert Millikan, che con il famoso esperimento delle gocce d'olio fu in grado di rivelare e misurare quella che per tutti oggi è l'unità elementare della carica elettrica della materia, la carica dell'elettrone. E come avverrebbe oggi se fossero scoperti i quark isolati, questo risultato consegnò a Millikan il premio Nobel nel 1923.

Fairbank e i suoi colleghi sostituirono alle gocce d'olio delle sfere di niobio, un materiale superconduttore, tenendole in sospensione sfruttando la levitazione magnetica per

bilanciare la gravità. Dopo avere monitorato accuratamente il modo in cui le singole sfere si muovevano sotto l'effetto di un campo elettrico variabile, il gruppo di Fairbank affermò di avere misurato la presenza di cariche frazionarie pari a $+1/3$ e $-1/3$ dell'unità di carica elettrica. Dopo la pubblicazione di questo risultato, il fisico statunitense Luis Alvarez (premio Nobel nel 1968), animato da giustificato sospetto, suggerì di ripetere l'esperimento facendo un'analisi "alla cieca" dei dati ottenuti, aggiungendo cioè valori casuali e sconosciuti alle cariche elettriche misurate, in modo che chi conduceva l'esperimento non conoscesse il reale valore delle singole cariche fino al completamento dell'analisi dei dati. Metodi analoghi sono applicati anche oggi, nei moderni esperimenti, per evitare che la pressione di eventuali pregiudizi condizioni l'analisi e porti a una falsa interpretazione dei dati, facendo emergere forzatamente il risultato atteso (vd. Asimmetrie n. 14 p. 20, ndr). La procedura fu applicata a

b. William Fairbank (a destra) che, come professore alla Stanford University, ideò e realizzò l'esperimento per la rivelazione dei quark liberi. Fairbank si è dedicato per oltre trent'anni a delicati esperimenti sulla superconduttività alle basse temperature.

un nuovo insieme di dati dell'esperimento di Fairbank e, quando l'analisi fu conclusa, il valore dei numeri casuali fu reso pubblico e sottratto alle cariche misurate. Dopo l'"apertura" (in inglese, *unblinding*) l'esito dell'esperimento non mostrava più la quantizzazione della carica a $+1/3$ o $-1/3$. L'analisi "alla cieca" portava quindi a risultati in disaccordo con quanto pubblicato da Fairbank: non c'era alcuna evidenza di cariche frazionarie libere. Già alcuni anni prima, a partire dal 1966 e per una quindicina d'anni a seguire, era stata condotta anche a Genova, dal fisico Giacomo Morpurgo, una lunga sperimentazione che sfruttava la levitazione magnetica di piccole sfere e grani di grafite, senza che fosse mai osservato il minimo segnale della presenza di cariche elettriche frazionarie libere.

È ormai opinione comune che l'esperimento di Fairbank sia stato affetto da qualche influenza esterna, forse un "effetto di fondo" magnetico, e che dunque non abbia realmente osservato quark liberi.

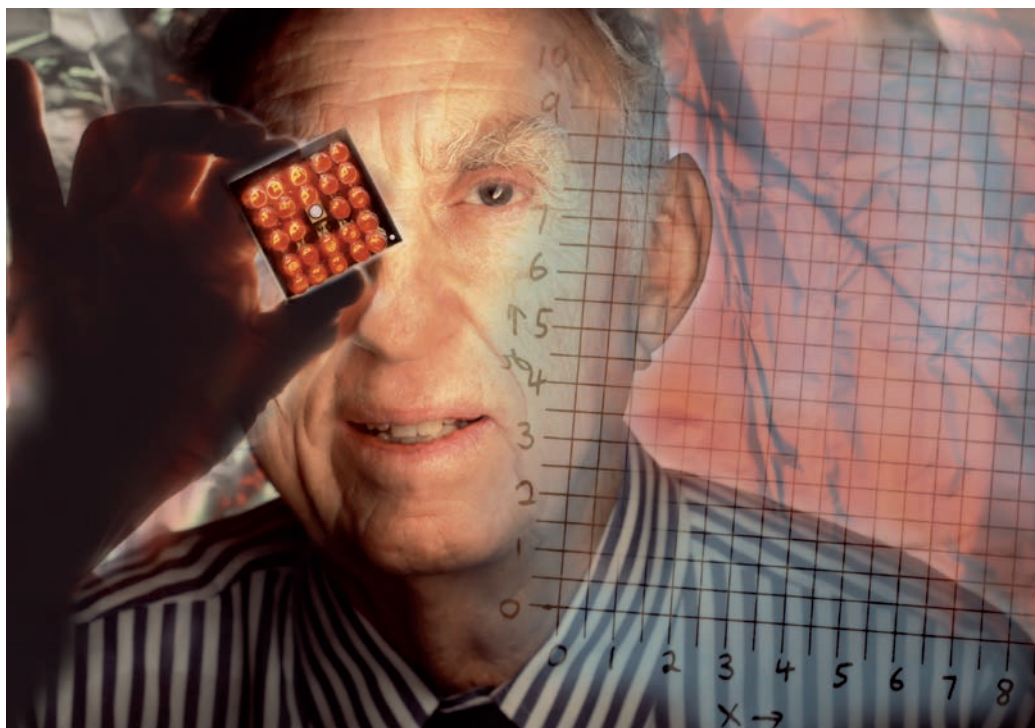
Ma le gocce d'olio di Millikan hanno continuato a ispirare i fisici anche dopo l'esperienza di

Fairbank. Sempre con l'idea di verificare la presenza di cariche frazionarie, la sola firma possibile dell'esistenza dei quark liberi, nel 1996 un gruppo di ricercatori condotto da Martin Perl ripropose nei laboratori americani dell'acceleratore Slac di Stanford

l'esperimento delle gocce d'olio. L'esperimento condotto da Perl ripercorreva quello di Fairbank, con poche ma significative differenze: l'uso di uno stroboscopio e di una videocamera permise al gruppo di monitorare automaticamente milioni di gocce, ottenendo valori molto precisi del diametro di ogni goccia, della loro velocità finale e della carica elettrica. In tutto, l'esperimento mostrò che, se ci fossero quark isolati con cariche $\pm 1/3$ o $\pm 2/3$, allora questi sarebbero presenti in quantità inferiori a uno su centinaia di miliardi di miliardi di protoni e neutroni.

Questo non permette di affermare che i quark liberi non esistono, e la cosa è per definizione impossibile da dimostrare sperimentalmente. Risultati come quello di Perl consentono soltanto di concludere che è molto improbabile che i quark isolati esistano o che, se esistono, sono estremamente rari.

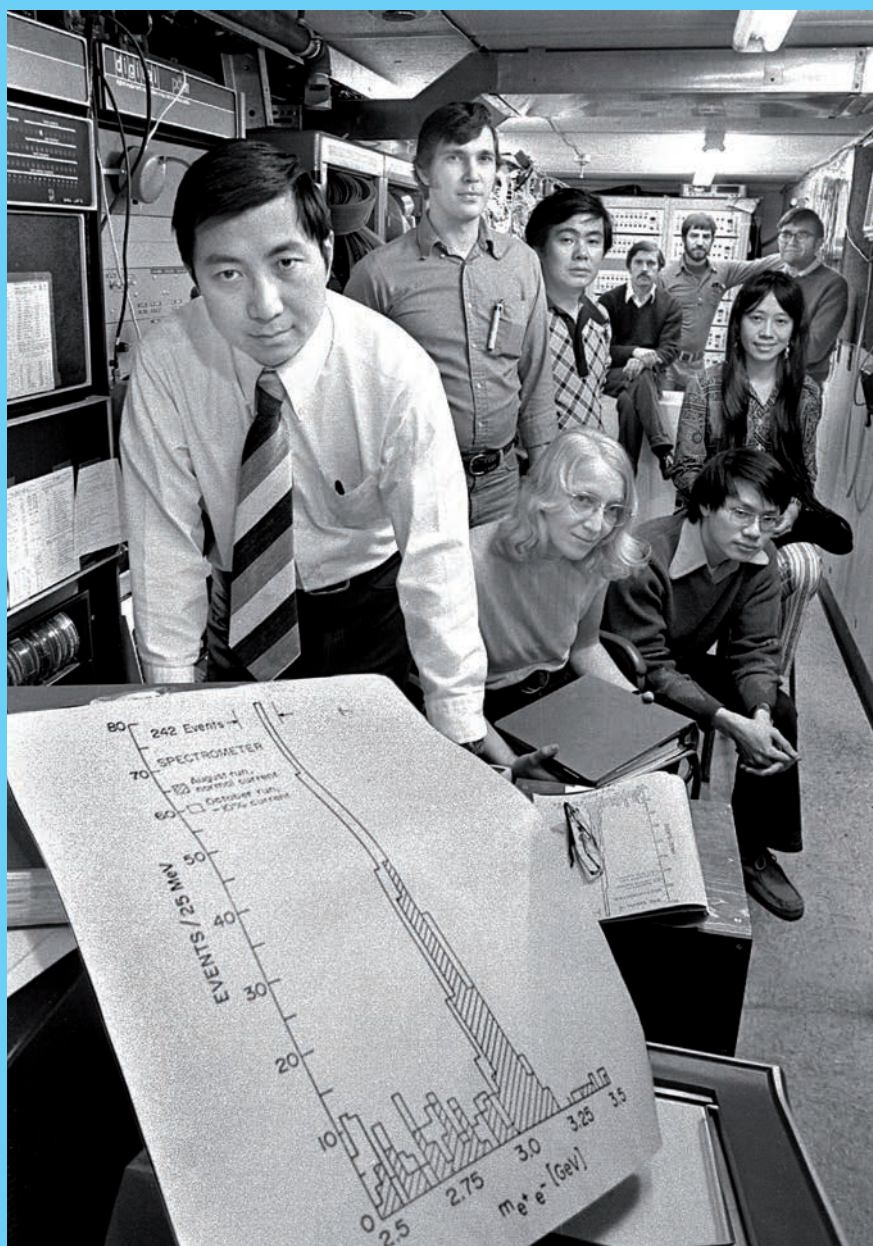
c.
Martin Perl, fisico statunitense dello Stanford Linear Accelerator Center (Slac), insignito nel 1995 del premio Nobel per la fisica (con Frederick Reines) per "i contributi sperimentali pionieristici alla fisica dei leptoni". Il Nobel a Perl si deve in particolare alla scoperta del leptone tau. Perl ha condotto a Slac nel 1996 l'ultima delle verifiche sperimentali sull'esistenza delle cariche frazionarie associabili ai quark liberi.



Fascino svelato

Il quark charm, dalla predizione teorica alla conferma sperimentale

di Roberto Mussa



Nel 1964, James Bjorken e Sheldon Glashow, per simmetria con il mondo dei leptoni, che qualche anno prima era stato organizzato in due doppietti (elettrone e neutrino elettronico, muone e neutrino muonico), ipotizzano l'esistenza di un quarto quark, oltre ai tre introdotti da Gell-Mann, che chiamano *charm* (dall'inglese, fascino). L'idea, inizialmente basata solo sul parallelismo leptoni-quark, acquista fondamento fisico nel 1970, grazie allo stesso Glashow, John Iliopoulos e Luciano Maiani, i quali mostrano che il charm spiega in maniera semplice e naturale alcuni fenomeni, altrimenti indecifrabili, riguardanti i *mesoni K neutri* (particelle composte da un quark down e un antiquark strange, vd. Asimmetrie n. 11 p. 28). La conferma dell'esistenza del charm arriva nel 1974, con la cosiddetta "rivoluzione di novembre": tre esperimenti, a Brookhaven, Stanford e, immediatamente dopo, a Frascati, osservano un nuovo mesone, con una massa di 3097 MeV (circa tre volte quella del protone). Alla particella viene dato un doppio nome, J/ψ , per riconoscere il merito dei due scopritori, Samuel Ting e Burton Richter, ai quali sarà conferito il premio Nobel nel 1976. Dieci giorni dopo l'annuncio della scoperta della J/ψ , l'esperimento di Stanford scopre un secondo mesone, chiamato ψ' , con una massa di 3686 MeV e caratteristiche simili alla J/ψ . Le due nuove particelle sono stati legati del quark charm, molto più pesante

a.
Samuel Ting e i colleghi
dell'esperimento con cui scoprì
la particella J/ψ a Brookhaven.

degli altri tre, e del suo antiquark: un sistema chiamato genericamente *charmonio*, in analogia con il *positronio* (lo stato legato di un elettrone e un positrone).

Come ogni sistema quantistico, il charmonio è caratterizzato da uno spettro di livelli energetici equivalenti alle masse dei diversi stati: la J/ψ e la ψ' sono due di questi stati. Ma, mentre nel caso del positronio, che è legato dalla forza elettromagnetica, la differenza di energia tra gli stati è dell'ordine di alcuni eV, nel caso del charmonio, che è legato dalla forza forte, molto più intensa, la differenza di massa tra gli stati è dell'ordine delle centinaia di MeV, cioè cento milioni di volte superiore.

Il modello a quark prevede che esistano anche dei mesoni contenenti il charm e un antiquark leggero, antiquark up o antiquark down. Questi mesoni, chiamati D, sono l'analogo "forte" dell'atomo di idrogeno (che è tenuto assieme dalla forza elettromagnetica): una particella leggera, come l'antiquark (l'elettrone nell'atomo di idrogeno), che orbita intorno a una particella pesante, il quark charm (il protone nell'idrogeno).

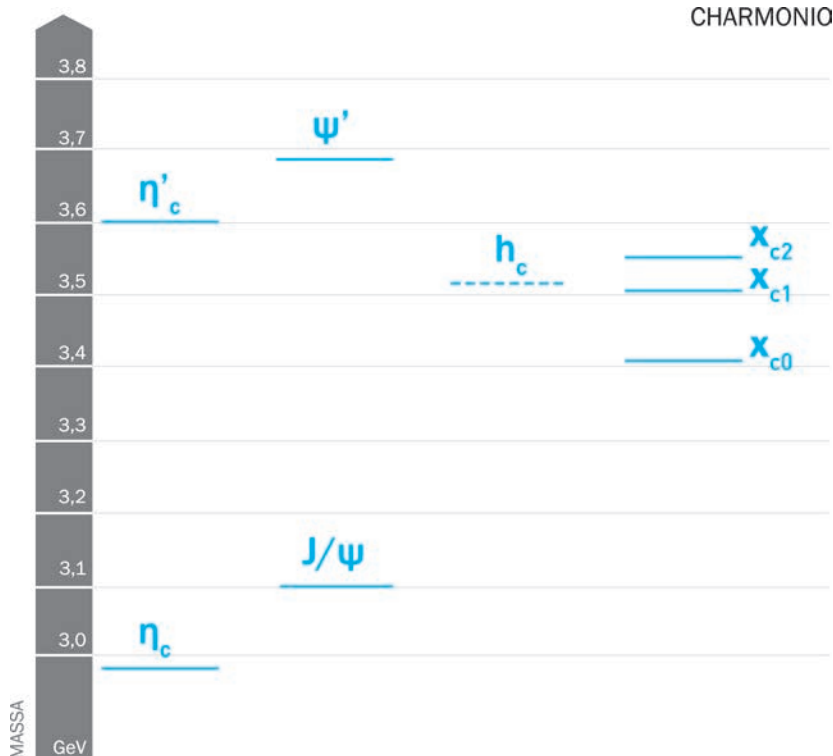
La scoperta del charm, nell'autunno del 1974, venne complicata da una incredibile

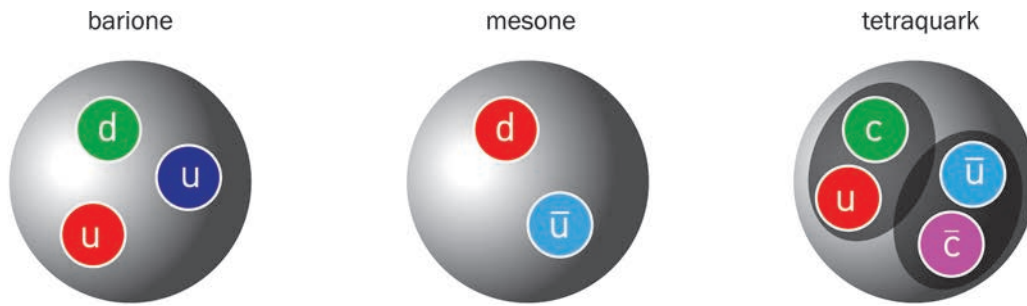
coincidenza: come si capì qualche mese dopo, nella stessa regione di energie esplorata a Stanford venivano prodotte coppie di un nuovo leptone pesante, il τ , la cui presenza (di cui all'inizio nessuno sospettava) alterava l'interpretazione dei dati sperimentali riguardanti il charmonio.

È in questa situazione confusa che Haim Harari suggerisce di introdurre due nuovi quark, che chiama *top* e *bottom*, o in alternativa *truth* e *beauty*. Sebbene il suo modello si rivelerà sbagliato (perché i risultati di Stanford si spiegano in termini del solo charm), l'idea di una nuova coppia di quark, già proposta per altri motivi da Kobayashi e Maskawa (vd. p. 33, ndr), era corretta e i nomi proposti da Harari rimarranno.

Ci vorranno ancora venti anni per completare sperimentalmente il quadro, con la scoperta del top (il sesto quark), ma l'esistenza del quinto quark non tarderà a essere confermata. Nel 1977, il gruppo di Leon Lederman al Fermilab scopre un nuovo mesone, che viene battezzato particella Υ , con una massa di 9,46 GeV, più di tre volte quella della J/ψ . La Υ è un esempio di bottomonio, stato legato del quark bottom e dell'antiquark

b.
Lo spettro degli stati del charmonio.
Le particelle indicate sono stati legati di un quark charm e un antiquark charm in diverse configurazioni quantistiche.





corrispondente. Successivamente, nel 1983, viene scoperto l'analogo del mesone D, il mesone B^0 , composto da un quark bottom e un antiquark down. Il sistema dei mesoni B è particolarmente importante, perché permette di studiare un fenomeno di grande rilevanza per la comprensione dell'universo, la violazione della simmetria CP (vd. p. 33, ndr), e le moderne *B-factories*, come Babar (negli Usa) e Belle (in Giappone), sono state progettate proprio per produrre in abbondanza questi mesoni.

Un dettaglio mancante nel quadro generale sono gli stati legati in cui la rotazione intrinseca (lo *spin*) del quark ha verso opposto a quella dell'antiquark. Questi stati ricoprono un ruolo rilevante per comprendere le interazioni forti. Nel sistema del charmonio, alla soglia del nuovo millennio, era nota solo la η_c , scoperta nel 1981, che è lo stato fondamentale del sistema, cioè il mesone di massa più piccola composto da un charm e un anticharm. Degli altri due stati previsti dalla teoria, η_c' e h_c , nessuno era stato visto da più di un esperimento. Per quanto riguarda il bottomonio, la situazione sperimentale era ancora peggiore, dato che nel 2006 non si aveva evidenza degli stati η_b e h_b .

La scoperta della η_c' (estate 2002) può essere considerata come il punto d'inizio della *quarkonium renaissance*: nel giro di due anni, gli esperimenti Belle, Cleo e Babar hanno trovato e confermato gli stati mancanti del charmonio. A partire dal 2006, è inoltre ripartita la caccia agli stati η_b e h_b del bottomonio, ricerca che ha condotto alla scoperta di questi stati (da Babar nel 2008 e da Belle nel 2010) attraverso meccanismi totalmente inattesi in precedenza.

Oltre agli stati previsti dalla teoria, ne sono stati scoperti di nuovi, e stiamo in un certo senso rivivendo l'atmosfera della "rivoluzione

di novembre", quando ipotesi teoriche e scoperte sperimentali si alternavano a passo vertiginoso. La prima di queste nuove particelle, soprannominata X(3872), scoperta nel 2003 da Belle, suggerisce che esistano degli oggetti esotici, composti da 2 quark e 2 antiquark, la cui interpretazione è ancora incerta. Una possibilità è che si tratti di tetraquark (un concetto introdotto da Luciano Maiani), cioè stati legati di un *diquark* (una coppia correlata di quark) e di un *antidiquark* (una coppia correlata di antiquark). In alternativa, sono stati ideati modelli di tipo molecolare, in cui due coppie quark-antiquark si combinano a formare stati legati con una debole interazione residua: una molecola adronica di questo tipo è costituita da due mesoni pesanti che interagiscono tramite lo scambio di pioni.

La possibilità di avere quark e antiquark di tipo up e down in aggiunta alla coppia charm-anticharm o bottom-antibottom, ha aperto nuove strade alla spettroscopia dei quark pesanti. La recente scoperta di nuovi stati denominati Z_c (di massa attorno ai 4 GeV) e Z_b (di massa attorno ai 10 GeV), oltre a chiarire ulteriormente lo spettro del charmonio e del bottomonio, apre prospettive nuove per gli esperimenti attuali e futuri in questo settore della fisica, come la Tau-charm factory Bes-III in Cina e la SuperB-factory Belle-II in Giappone.

c.

Composizione a quark degli adroni ordinari, barione e mesone, e composizione ipotetica dei nuovi mesoni (tetraquark) scoperti da Belle e Babar.

Biografia

Roberto Mussa, laureato a Torino nel 1987, ha studiato la fisica del charmonio negli esperimenti E760 e E835 al Fermilab e del bottomonio nell'esperimento Belle al Kek, in Giappone. Attualmente è impegnato nella realizzazione di Belle-II. Nel 2002 ha co-fondato il gruppo di ricerca teorico-sperimentale Qwg (www.qwg.to.infn.it), finalizzato all'approfondimento degli aspetti della fisica del quarkonio.

Rotture spontanee

Simmetrie da premio Nobel

di Massimo Testa

a.
Peter Higgs (il secondo a sinistra)
e Francois Englert (a destra)
durante la cerimonia ufficiale di
premiazione del Nobel a
Stoccolma il 10 dicembre scorso.



8 ottobre 2013, quasi 50 anni dopo l'*annus mirabilis*: grande fermento nel mondo della fisica delle particelle, per l'annuncio del Nobel della fisica conferito a Peter Higgs e al suo collega Francois Englert per la "scoperta teorica del meccanismo che contribuisce alla comprensione dell'origine delle massa delle particelle subatomiche confermato recentemente (il 4 luglio 2012, ndr) al Large Hadron Collider dagli esperimenti Atlas e Cms". L'ideazione di questo meccanismo coinvolge la *rottura* di una simmetria. Vediamo di che si tratta. Le simmetrie sono un fondamentale strumento di esplorazione della fisica moderna. Una simmetria è

un'operazione eseguita su un sistema fisico, che trasforma uno stato possibile del sistema in un altro stato possibile. Per illustrare il concetto di simmetria ricorriamo a un esempio concreto. Immaginiamo di considerare un sistema meccanico: possiamo pensare, ad esempio, a un orologio, un oggetto, cioè, capace di mantenere un movimento uniforme (il moto delle lancette), quando sia collocato in qualunque posizione nello spazio e nel tempo. Il moto delle lancette dell'orologio, come quello di qualsiasi sistema meccanico isolato, in cui cioè l'influenza dell'ambiente esterno sia trascurabile, risulta essere invariante rispetto a due simmetrie fondamentali:

la simmetria sotto traslazioni spaziali e la simmetria sotto traslazioni temporali. L'invarianza rispetto alle traslazioni spaziali, ad esempio, si manifesta nel fatto che il moto dell'orologio non viene influenzato, se esso viene collocato in un luogo diverso. Questa è la proprietà fondamentale che determina l'utilità dell'orologio come misuratore del tempo: dieci minuti in un luogo hanno la stessa durata di dieci minuti in un altro luogo. Queste proprietà di invarianza, che a prima vista possono sembrare ovvie, implicano le ben note *leggi di conservazione*. La simmetria sotto traslazioni spaziali porta alla conservazione della quantità di moto,

mentre un'analogia simmetria sotto traslazioni temporali porta alla conservazione dell'energia. Siamo in presenza di una proprietà molto generale, sintetizzata dal teorema di Emmy Noether (vd. Asimmetrie n. 11 p. 14, ndr): ad ogni trasformazione continua di simmetria corrisponde in fisica una legge di conservazione.

Non tutte le simmetrie di interesse fisico, tuttavia, sono così facilmente visualizzabili come le traslazioni spaziotemporali. La conservazione della carica elettrica, ad esempio, deriva da una simmetria che può essere descritta solo in termini matematici astratti.

Strettamente collegata al concetto di simmetria è l'idea della *rottura spontanea di simmetria*, cioè di una simmetria che viene violata in termini "dinamici".

Una rottura spontanea consiste nel fatto che lo stato di energia minima di un sistema (il cosiddetto *stato fondamentale*) ha un livello di simmetria inferiore di quello delle forze che lo generano. Un esempio classico è fornito da una sbarra elastica, compressa da una forza che agisce lungo il suo asse (vd. fig. b). La simmetria di cui parliamo in questo esempio è costituita dalle rotazioni intorno all'asse della sbarra. Se la compressione applicata alla sbarra si mantiene al di sotto di un certo limite, la sbarra elastica si accorcerà leggermente sotto l'azione della forza e quindi la sua posizione di equilibrio continuerà a

essere simmetrica sotto rotazioni. Se, tuttavia, la forza di compressione supera una certa soglia, la sbarra si piegherà e ci troveremo così in presenza di un numero infinito di stati di equilibrio equivalenti, non invarianti sotto una rotazione, ma tali che una rotazione li trasformi uno nell'altro: in questa situazione lo stato fondamentale non è simmetrico, cioè non è invariante sotto rotazioni, benché la forza che ha generato questa rottura di simmetria sia di per sé simmetrica rispetto alla rotazione.

Il concetto di rottura spontanea di simmetria nasce nell'ambito degli studi sulla struttura della materia, in particolare nella teoria dei sistemi come l'elio liquido che, a bassissime temperature, esibisce il fenomeno della *superfluidità*, ed è un'idea basilare nella spiegazione della superconduttività.

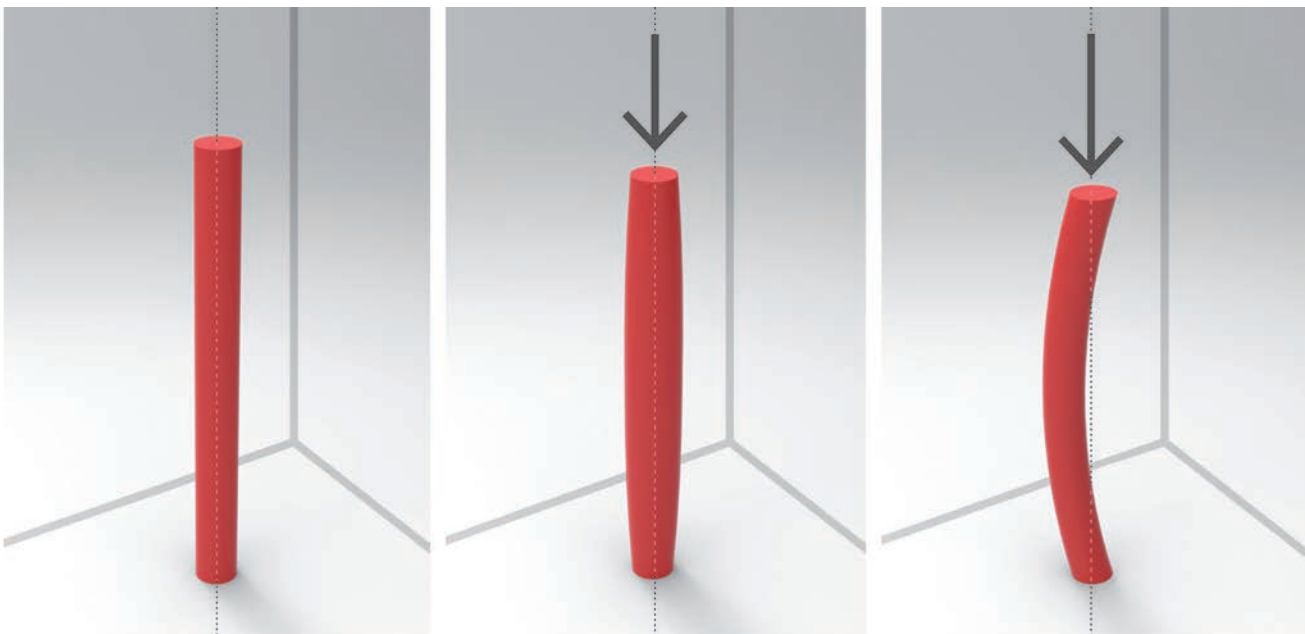
L'estensione di questo meccanismo alla fisica delle particelle si deve ai lavori di Giovanni Jona-Lasinio, Yoichiro Nambu e Jeffrey Goldstone del 1961 (vd. p. 30, ndr), in cui venne mostrato come, in conseguenza di una rottura spontanea, siano necessariamente presenti, nella teoria in esame, particelle a massa nulla, i cosiddetti *bosoni di Goldstone*. Siccome l'unica particella di massa nulla in natura è il fotone, inizialmente questo meccanismo fu poco considerato come base per nuovi modelli di particelle elementari, perché avrebbe introdotto particelle non esistenti in natura.

b.

A sinistra, una sbarra elastica non soggetta a forze è simmetrica per rotazioni intorno al suo asse (tratteggiato).

Al centro, sottoposta a una leggera pressione, la sbarra rimane simmetrica rispetto a una rotazione.

A destra, invece, se la forza è molto elevata, la sbarra si piega e lo stato di equilibrio che si stabilisce non è più simmetrico rispetto a una rotazione.





c.
Jeffrey Goldstone intorno al 1980.

Fu poi riesumato, quasi simultaneamente, nella teoria della materia condensata nel 1963 da Philip Warren Anderson e nella fisica delle particelle nel 1964 da Peter Higgs, all'Università di Edimburgo, e dai belgi Francois Englert e Robert Brout. I futuri premi Nobel (ad eccezione di Brout, morto nel 2011, ndr) ipotizzarono questo meccanismo in presenza di forze a lungo raggio, dovute a cosiddetti *campi di gauge*, di cui il fotone è l'esempio più elementare. I campi di gauge possono assorbire i bosoni di Goldstone conseguenti alla rottura spontanea, dando luogo a particelle di *spin* (momento angolare intrinseco) 1 e massa diversa da zero (a differenza del fotone, che ha massa nulla). Questo fenomeno, che ha un carattere generale, è divenuto noto nella letteratura scientifica come *meccanismo di Higgs*.

Una delle caratteristiche fondamentali delle particelle elementari è la loro massa, ossia la quantità che ne regola il comportamento meccanico quando vengono sottoposte a forze. In una teoria compatibile con la relatività ristretta possono esistere anche particelle a massa nulla, che devono muoversi alla velocità della luce. Una teoria delle particelle fondamentali dovrebbe essere in grado di prevederne tutte le proprietà, tra cui, in particolare, la massa. Basandosi sul meccanismo di Higgs e su importanti contributi alla teoria delle interazioni deboli da parte di Sheldon Lee Glashow, Steven Weinberg e Abdus Salam nel 1967 formularono la teoria del modello standard, ossia quella che oggi è la teoria più accreditata sulle proprietà delle particelle e delle loro interazioni. Nel modello standard si prendono le mosse dalla cosiddetta *simmetria chirale*

che richiede che tutte le particelle fondamentali siano a massa nulla. Data l'assenza in natura di particelle di massa nulla, la simmetria chirale viene violata grazie al meccanismo della rottura spontanea e porta a una situazione in cui la massa delle particelle può essere diversa da zero. I bosoni di Goldstone, inizialmente a massa nulla, si combinano grazie al meccanismo di Higgs con i bosoni di gauge, anch'essi inizialmente a massa nulla, dando origine a particelle vettoriali (ossia di *spin* 1) aventi massa, a eccezione del fotone, la cui massa rimane zero. Questa sequenza di passaggi matematici realizza il meccanismo di Higgs e l'unica traccia che rimane alla fine di questo percorso teorico, è il bosone di Higgs, la cui esistenza è stata confermata nel 2012 dagli esperimenti Atlas e Cms al Cern di Ginevra.

Biografia

Massimo Testa lavora nel campo della fisica teorica delle alte energie. Ha compiuto ricerche presso vari centri internazionali come il Cern di Ginevra, il California Institute of Technology, l'Ecole Normale e l'Ecole Polytechnique di Parigi. È professore ordinario dal 1986, prima all'Università di Lecce e dal 1990 presso la Sapienza, Università di Roma.

Fertili analogie

A conversazione con Giovanni Jona-Lasinio

di Antonella Varaschin



“Era il settembre del 1959 quando partii per Chicago. Ci andai proprio con l’idea di lavorare con Yoichiro Nambu. Lo avevo sentito qualche mese prima durante un seminario a Roma e avevo subito pensato che era la persona con cui avrei voluto lavorare”. Inizia così il suo racconto Giovanni Jona-Lasinio, oggi professore emerito dell’Università La Sapienza di Roma, nei primi anni ’60 uno dei protagonisti degli studi in teoria dei campi che aprirono la strada alla formulazione del meccanismo di Higgs. A quei tempi, Jona-Lasinio era un giovane scienziato a inizio carriera. Nambu lo considerò da subito il suo collaboratore e gli spiegò la possibile analogia tra simmetria di gauge nella superconduttività e simmetria chirale in fisica delle particelle. “Nambu e io facemmo un

conto, che oggi non è più di grande interesse ma che allora considerammo essenziale per capire se eravamo sulla buona strada. E ottenemmo risultati diversi. Tra l’altro, se il suo risultato era quello giusto, significava che forse l’analogia con la superconduttività non era da perseguire. Lo ripetemmo una seconda volta: idem. Alla terza mi manifestò la sua insoddisfazione, convinto che io sbagliassi. Io però ero sicuro dei miei conti e gli suggerii di applicare il teorema di de L’Hôpital, poiché si trattava di valutare la differenza di due diagrammi di Feynman divergenti: rifece il conto e ottenne il mio stesso risultato. ‘You won’ – hai vinto – mi disse con tono non proprio contento. Ma da quel momento in poi ebbe fiducia nelle mie capacità”.

a.
Giovanni Jona-Lasinio nel suo studio, all’Università La Sapienza di Roma, durante l’intervista nel gennaio scorso.

“La collaborazione con Nambu fu assolutamente piacevole. Il suo modo di impostare le cose basandosi su analogie mi era congeniale, perché per inclinazione naturale io funziono soprattutto per associazione di idee. Iniziammo subito a condividere e discutere l'idea che lui aveva in testa, ma che era ancora piuttosto vaga”. Nambu si era dedicato allo studio della teoria della superconduttività, a quei tempi molto in voga negli Stati Uniti e pressoché sconosciuta in Italia. Ed era rimasto molto stupito che la teoria della superconduttività, nella forma che aveva allora, non soddisfacesse alla simmetria di gauge. Si era dedicato così a cercare un modo per ristabilire questa simmetria. “Nambu non fu il solo ad affrontare questo problema, ma un grande merito del suo lavoro fu l'aver riformulato la teoria della superconduttività nel linguaggio della teoria dei campi, quindi nel linguaggio della fisica delle particelle”. Tra le simmetrie della teoria delle

particelle vi era la simmetria chirale, una delle ipotesi della teoria delle interazioni deboli, che imponeva l'annullarsi della massa delle particelle che obbediscono alla statistica di Fermi. Sperimentalmente però non era così. “Bisognava eludere questo vincolo. Lo si poteva fare con un meccanismo che avevamo chiamato *meccanismo dinamico*, dove interveniva appunto l'analogia con la superconduttività. Dovevamo tuttavia elaborare un modello relativistico di particelle. Iniziammo a costruirlo ispirandoci alla teoria che in quegli anni Heisenberg propagandava con grande enfasi: l'esistenza di tutte le particelle si può ricavare da un'unica equazione”. Questa equazione era però poco accettabile per la teoria dei campi, poiché non era rinormalizzabile e non si capiva bene che significato avesse. La teoria di Heisenberg non ebbe successo, però conteneva delle idee interessanti, in particolare proprio l'idea di rottura spontanea di simmetria. “Prendemmo allora questa teoria e la trattammo in

modo brutale, applicando quello che in gergo si chiama *cut-off*, cioè limitando le energie in gioco. Cominciammo a fare i conti e a tirar fuori le conseguenze di questa ipotesi. In particolare, risultava che oltre alle particelle fermioniche dotate di massa, esistevano bosoni a massa zero, chiamati in seguito bosoni di Goldstone. Il nostro era un calcolo fatto con un'approssimazione poco attendibile, dato che si trattava di interazioni forti, ma il risultato era molto interessante”.

Nambu fu invitato a parlare di questo lavoro ancora in fieri all'annuale Midwest Conference in Theoretical Physics della Purdue University. Solo che dovette rinunciare per problemi familiari, e vi mandò il giovane Jona-Lasinio. “Andavo a presentare idee completamente nuove a una platea fatta dai guru della superconduttività e della teoria dei campi. Insomma, la notte precedente dormii poco. Ma alla fine andò molto bene, anzi, ci furono incoraggiamenti a proseguire su quella strada”.



b.
Giovanni Jona-Lasinio con Yoichiro Nambu durante un seminario per gli studenti del Dipartimento di Fisica dell'Università di Osaka, in Giappone, il 30 luglio 2013.



C.
Yoichiro Nambu (nella foto) e
Giovanni Jona-Lasinio hanno avuto
una proficua collaborazione
scientifica dagli anni '60.

Così prima dell'estate, era il '60, Nambu e Jona-Lasinio inviarono per la pubblicazione il loro primo lavoro scritto assieme, dal titolo *Dynamical Model of Elementary Particles Based on an Analogy with Superconductivity*. Nambu curò la parte generale, Jona-Lasinio quella dei conti. "Lì per lì, l'articolo non fu accolto da grande entusiasmo. Ma c'è un dettaglio divertente. Proprio all'ultimo io volli aggiungere una sezione che si chiamava 'teoria fenomenologica', perché volevo capire a livello fenomenologico come questo modello potesse essere messo alla prova. Scrissi alcune equazioni e Nambu fu d'accordo nell'inserirle. E qualche anno dopo sentii Peter Higgs durante un seminario dedicato al suo lavoro da Nobel iniziare la sua esposizione proprio da quella sezione".

"Al momento della sua pubblicazione, l'articolo di Higgs fu accolto con un po' di rammarico da parte nostra, perché avevamo tutti gli elementi per farlo noi: nella teoria della superconduttività è presente il meccanismo di Higgs. Per trasportarlo nella teoria dei campi mancava solo un ingrediente, bastava accoppiare le equazioni che avevo scritto con un campo di gauge. Un paio d'anni dopo il nostro articolo, uscì un lavoro di Baker e Glashow che riprendeva la nostra idea e introduceva per la prima volta il termine di 'rottura spontanea di

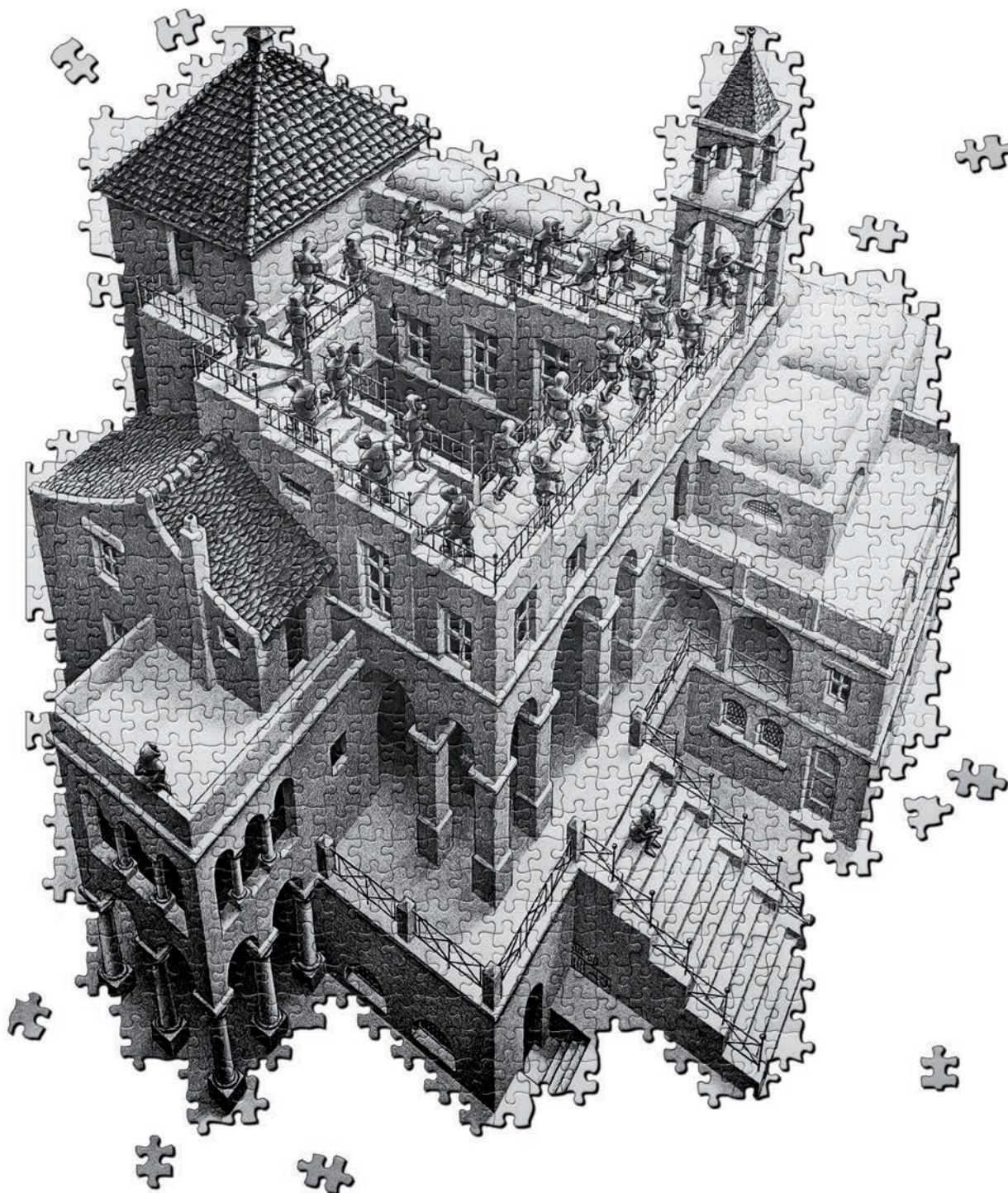
simmetria'. Pur essendo un fenomeno comunissimo, infatti, nella materia e nella vita di tutti i giorni (un esempio è il magnetismo), fino a quel momento non aveva avuto un nome. Non era stato colto come un fenomeno generale. Questo succede spesso nella scienza: un problema si vede solo dopo che uno in un qualche modo l'ha risolto, l'ha capito. Comunque, sta di fatto che noi non abbiamo spinto le nostre analogie abbastanza oltre. Dopo aver pubblicato il lavoro tornai in Italia, penso sbagliando, perché negli Stati Uniti avrei potuto proseguire per qualche tempo la collaborazione con Nambu con cui avevamo raggiunto un notevole affiatamento". Al suo rientro a Roma nel 1961, Jona-Lasinio cercò di capire come si potesse formulare in generale l'idea di rottura di simmetria sottostante al loro modello. Sviluppò così un concetto oggi accettato tanto da trovarsi nei libri di testo della teoria dei campi: quello di *azione efficace*. Tuttavia si allontanò dalla fenomenologia delle particelle per iniziare un percorso che continua tuttora, nella meccanica statistica, trasferendovi idee della teoria dei campi. "Sono state ancora le analogie a caratterizzare il mio percorso successivo alla collaborazione con Nambu. La conferma della loro efficacia mi ha dato molte soddisfazioni. Nonostante ciò qualche volta ho provato una certa nostalgia per le particelle!".

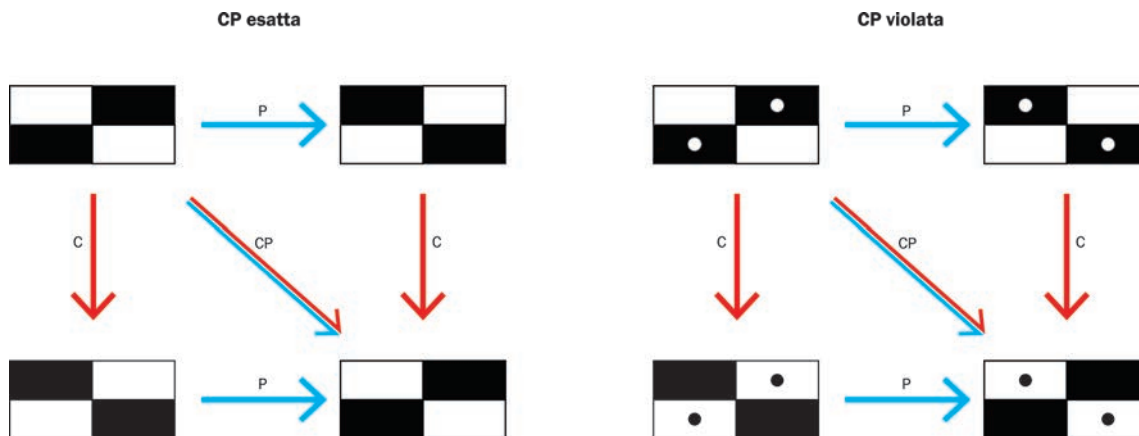
Specchi imperfetti

La simmetria CP e la sua violazione

di Marcella Bona

a.
Come in un puzzle, pezzo dopo pezzo, a partire dagli anni '60, in fisica si è composto un castello incantato, pieno di stanze, torri e scale, che gli scienziati chiamano modello standard. Il puzzle, però, ancora non è stato completato: attorno al castello potrebbe sorgere un'intera città, quella che i ricercatori chiamano "nuova fisica".





Negli ultimi 50 anni, a partire dal 1960, idea dopo idea, misura dopo misura, mattone dopo mattone, si è iniziato a costruire un castello incantato pieno di stanze, torri e scale. Lo chiamiamo modello standard. È la visione più completa che abbiamo fino ad ora sulle leggi della natura, perché dà una descrizione unificata di tre delle quattro forze fondamentali. In questi anni il castello è diventato abbastanza solido e articolato. Abbiamo scoperto nuove particelle fondamentali e nuove caratteristiche delle loro interazioni. Abbiamo continuato ad aggirarci per queste stanze, scale, torri, e a esplorarne ogni angolo. Da un lato abbiamo continuato ad assemblare e rendere più solida la nostra costruzione (cioè continuato a fare scoperte). Dall'altro lato, abbiamo incominciato a preoccuparci un po' di più delle fondamenta e dell'ambiente circostante. Recentemente, nel luglio del 2012, siamo riusciti a rinforzare significativamente le fondamenta del castello con la scoperta del bosone di Higgs che ci ha dato la conferma definitiva della solidità della nostra costruzione.

Alcune caratteristiche delle interazioni fondamentali sono state delineate fin dall'inizio, come conseguenza delle simmetrie del modello standard. Le simmetrie rappresentano proprietà della formulazione matematica delle nostre teorie e corrispondono a proprietà di invarianza nel comportamento delle forze fisiche descritte. Ad esempio, la forza forte (che agisce tra i quark) e la forza elettromagnetica (che agisce tra le particelle cariche) non cambiano il loro modo di agire se applicate su un dato sistema o sulla sua versione speculare (la cosiddetta *trasformazione di parità P*, ovvero di *inversione spaziale*). Analogamente, non cambiano se si trasformano tutte le particelle del sistema in antiparticelle (*trasformazione di coniugazione di carica C*). Invece, la forza debole (ovvero quella che regola, ad esempio, i decadimenti radioattivi) si comporta in modo diverso: vede come diversi due sistemi che sono legati tra loro da una semplice trasformazione di parità o di coniugazione di carica. Questo comportamento si chiama *violazione di simmetria*: in questo caso una violazione, rispettivamente, di parità P e di coniugazione di carica C. Questo diverso comportamento della forza debole fu ipotizzato dai fisici Tsung-Dao Lee e Chen Ning Yang e poi immediatamente osservato dal gruppo sperimentale guidato da Chien-Shiung Wu nel 1957. Pur essendo C e P violate, potrebbe darsi che la combinazione delle due trasformazioni rappresenti una simmetria del sistema:

b.

La trasformazione di parità (P) si può rappresentare come una riflessione allo specchio (o un'inversione attorno all'asse di simmetria orizzontale). La coniugazione di carica (C) invece tramite la conversione di bianchi in neri e viceversa. In assenza di pallini (a sinistra), il rettangolo in alto a sinistra sarebbe indistinguibile da quello ottenuto applicando successivamente P e C (oppure C e poi P), sarebbe cioè CP-invariante, ma non P- o C-invariante e la simmetria CP sarebbe esatta. La presenza dei pallini (a destra) fa sì che il rettangolo non sia più nemmeno CP-invariante: in questo caso, cioè, anche CP è una simmetria solo approssimata ed è dunque violata in questo rettangolo.

se le coordinate spaziali vengono invertite come in uno specchio e le particelle vengono sostituite da antiparticelle, abbiamo applicato una trasformazione CP (vd. fig. b). Per un breve periodo si credette che la simmetria CP fosse rispettata dall'interazione debole. Ma nel 1964, proprio nell'*annus mirabilis*, James Cronin e Val Fitch dimostrarono sperimentalmente che anche questa simmetria viene violata. Questa scoperta ne innescò molte altre e generò un buon numero di domande, alcune delle quali sono ancora senza risposta. La prima domanda a cui si tentò di rispondere fu come inserire questa scoperta sperimentale nella descrizione matematica della teoria.

In realtà, il seme della risposta era già stato piantato un anno prima dal fisico italiano Nicola Cabibbo, che aveva capito che l'interazione debole vede i vari quark (o piuttosto le particelle costituite dai quark, visto che i quark ancora non erano stati esplicitamente teorizzati) non singolarmente, ma mescolando tra loro i vari tipi. Una specie di "miopia" dell'interazione debole che, non vedendoci bene e non capendo la differenza tra due quark differenti, agisce su entrambi. Si dice, infatti, che gli oggetti fisici siano dati da una *sovrapposizione* dei vari tipi di quark presenti nella teoria. L'idea di Cabibbo era potenzialmente risolutiva, ma ci vollero altri dieci anni perché venisse capita ed estesa.

Infatti, da lì a poco, il modello a tre quark fu proposto da Murray Gell-Mann e George Zweig. Un quarto quark, il quark, fu ipotizzato successivamente da diversi gruppi e scoperto nel 1974 (vd. p. 24, ndr). Con un modello a quattro quark o, piuttosto, a due famiglie di due quark ciascuna, il *mescolamento* proposto da Cabibbo (vd. Asimmetrie n. 11 p. 22, ndr) entrava in modo naturale nella descrizione matematica.

Nel caso di due famiglie di quark questo viene determinato da un solo parametro, oggi chiamato non a caso *angolo di Cabibbo*. Questo schema non riusciva però a incorporare in modo naturale la violazione della simmetria CP. Bisognava essere ancora più audaci e ipotizzare che ci fosse una terza famiglia di quark da scoprire. Questa fu proposta nel 1973 da Makoto Kobayashi e Toshihide Maskawa e i due nuovi quark corrispondenti furono trovati rispettivamente nel 1977 (il quark bottom) e nel 1994 (il quark top). Il mescolamento tra le tre famiglie viene ora descritto da una *matrice* (una tabella ordinata di numeri) che viene chiamata *matrice CKM*, da Cabibbo-Kobayashi-Maskawa. Questa dipende da quattro parametri: tre di questi descrivono il mescolamento tra le tre famiglie e il quarto, la vera novità rispetto allo schema a due famiglie, è il parametro che può generare la violazione di CP. Così ora si riesce a “prevedere” come l’interazione debole possa agire diversamente su un sistema di particelle e quello speculare delle rispettive antiparticelle (cioè, ottenuto dal primo attraverso una trasformazione CP).

Per una misura sperimentale di questo parametro si dovette aspettare fino al 2001, quando due esperimenti, uno negli Stati Uniti (Babar, a cui hanno collaborato molti ricercatori italiani) e l’altro in Giappone (Belle), sono riusciti a misurarlo direttamente. Da allora le misure si sono fatte molto più precise e ora abbiamo un quadro abbastanza chiaro di questo fenomeno, per il quale Makoto Kobayashi e Toshihide Maskawa hanno ricevuto il premio Nobel nel 2008.

Ma tornando a esaminare la nostra costruzione, che sembra ora così solida, troviamo invece ancora angoli oscuri e parti pericolanti. In particolare la differenza nel modo in cui l’interazione debole vede la materia e l’antimateria potrebbe avere conseguenze cruciali riguardo all’intero universo.

Se immaginiamo di tornare al momento del Big Bang e ipotizziamo che le leggi della natura siano perfettamente identiche per materia e antimateria, dalla pura energia del Big Bang ci dobbiamo aspettare la produzione di materia e antimateria in egual quantità. Ma, osservando l’universo attuale, vediamo per lo più materia. Dove è andata a finire tutta l’antimateria? Questa è una domanda ancora senza risposta, ma sicuramente la violazione di CP gioca un ruolo fondamentale, come intuito per primo dal fisico russo Andrej Sakharov nel 1967. Purtroppo, però, stando alle conoscenze attuali, nel modello standard non esiste un meccanismo abbastanza efficiente da produrre l’universo asimmetrico che osserviamo, che quindi richiede la presenza di nuova fisica oltre a quella standard.

Insomma, dopo più di 50 anni, il nostro castello è ora piuttosto grande e ben arredato. Le sue fondamenta sono sempre più solide e ben radicate. E questo ci permette di avere dei punti fermi da cui partire. Ma sappiamo che dobbiamo ancora scoprire una città attorno a questo castello. Una città in cui questo castello deve essere il più possibile integrato, perché è il risultato degli sviluppi teorici e sperimentali degli ultimi 50 anni. Detto in altro modo, gli studi del futuro dovranno confrontarsi con quanto già scoperto e misurato. Ma questa città è ancora, per il momento, del tutto sconosciuta. I fisici teorici continuano a proporre possibili “planimetrie” e i fisici sperimentali organizzano gli esperimenti per verificarle o confutarle.



c.
Il fisico romano Nicola Cabibbo, scomparso nell’agosto del 2010.

Biografia

Marcella Bona insegna fisica delle particelle all’università londinese Queen Mary e svolge il suo lavoro di ricerca sull’esperimento Atlas al Cern. Ha lavorato a lungo sulla fisica dei quark pesanti nell’esperimento Babar e nel progetto fenomenologico Unitarity Triangle fit.

Link sul web

<http://www.quantumdiaries.org/2011/11/14/what-exactly-is-cp-violation/>
http://www.phy.bris.ac.uk/groups/particle/PUS/A-level/CP_violation.htm
<http://cerncourier.com/cws/article/cern/28092>
<http://www.nevis.columbia.edu/daedalus/motiv/cp.html>
http://scienzapertutti.lnf.infn.it/index.php?option=com_content&view=article&id=439:la-simmetria-cp&catid=215&Itemid=395

Grovigli quantistici

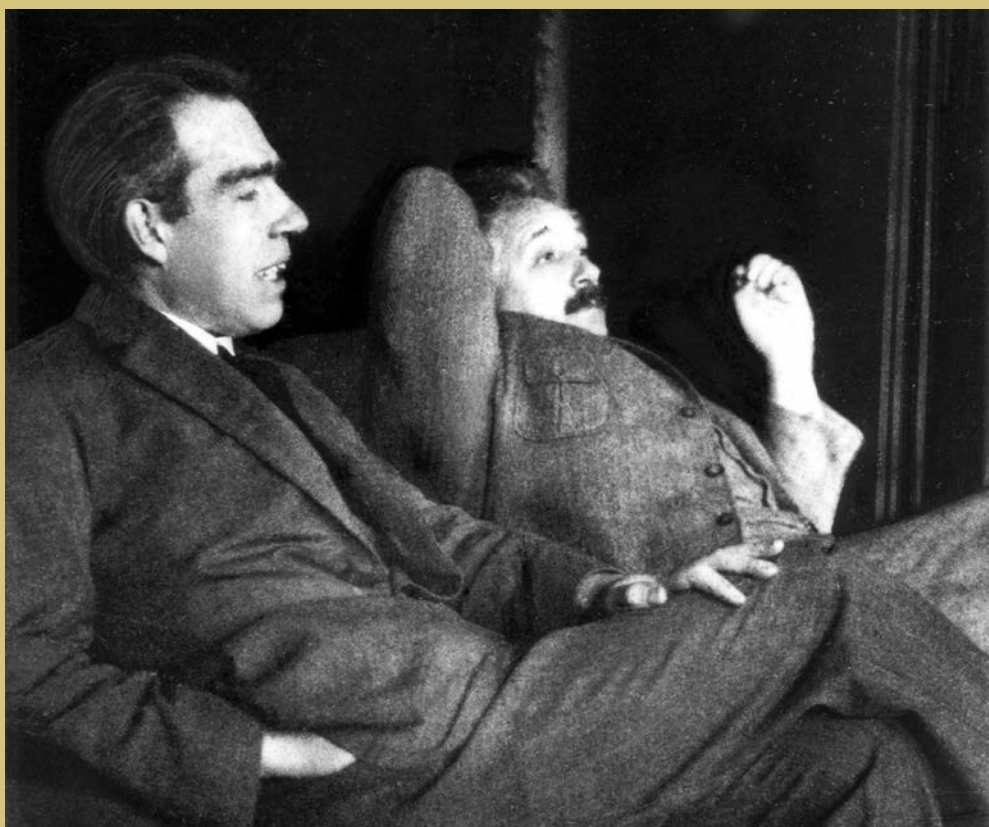
La meccanica quantistica alla prova

di Fabio Sciarrino

a.

Niels Bohr e Albert Einstein, fotografati a Leiden nella casa di Paul Ehrenfest nel dicembre 1925.

La meccanica quantistica è forse la più grande rivoluzione scientifica del secolo scorso, la cui nascita ha dato luogo a un intenso dibattito nella comunità scientifica dell'epoca e degli anni seguenti. I suoi fondamenti risalgono agli anni venti del secolo scorso, quando la teoria dei quanti si affermò come la teoria maggiormente accreditata per lo studio degli atomi. Elemento fondamentale di questa teoria è la funzione d'onda: essa contiene al suo interno tutte le informazioni dinamiche di un sistema fisico. Sulla natura della funzione d'onda si è a lungo dibattuto. In particolare nella metà degli anni venti ci si chiedeva se la meccanica quantistica fosse una teoria ontologica, ovvero se la funzione d'onda rappresentasse la realtà del mondo, o se rendesse possibile solo una lettura epistemologica, in grado di descrivere bene i risultati sperimentali e il funzionamento della natura. Infatti, il fisico danese Niels Bohr, probabilmente il massimo rappresentante di quest'ultima interpretazione, detta per questo di *Copenaghen*, affermava che "lo scopo della descrizione della natura non è cercare l'essenza reale dei fenomeni ma soltanto l'indagare, con la massima profondità possibile, le relazioni fra i molteplici aspetti della nostra esperienza". Tale approccio, di natura estremamente pragmatica, fu identificato con l'acronimo Fapp ovvero *For all practical purposes* (per tutti i fini pratici). L'approccio Fapp fu inizialmente molto dibattuto e iniziò a consolidarsi all'interno della comunità scientifica al quinto convegno di Solvay svoltosi nel 1927 a Bruxelles. L'accesa discussione sollevata dall'affermarsi dell'interpretazione di Copenaghen sulla natura della meccanica quantistica aveva tra i suoi protagonisti Albert Einstein, il quale riteneva che la meccanica quantistica, sebbene corretta, non fosse una teoria completa, dal momento che, seguendo i suoi precetti, si andava incontro a diversi paradossi. Einstein



non accettava il carattere intrinsecamente probabilistico della meccanica quantistica, come ben evidenziato dalla sua celebre frase "Dio non gioca a dadi". Nel 1935, Einstein, assieme a Boris Podolsky e Nathan Rosen, nel lavoro *Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?* (Può la descrizione quanto-meccanica della realtà essere considerata completa?) cercò di confutare la teoria della meccanica quantistica. Basandosi sui principi di *realtà* (ovvero se, senza disturbare il sistema in esame, possiamo predire con certezza il valore di una certa quantità fisica, allora esiste un elemento

b.

L'articolo a firma di Einstein, Podolsky e Rosen, apparso sul numero 47 del Physical Review Letters il 15 maggio del 1935.

MAY 15, 1935

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 47

Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?

A. EINSTEIN, B. PODOLSKY AND N. ROSEN, *Institute for Advanced Study, Princeton, New Jersey*

(Received March 25, 1935)

In a complete theory there is an element corresponding to each element of reality. A sufficient condition for the reality of a physical quantity is the possibility of predicting it with certainty, without disturbing the system. In quantum mechanics in the case of two physical quantities described by non-commuting operators, the knowledge of one precludes the knowledge of the other. Then either (1) the description of reality given by the wave function in

quantum mechanics is not complete or (2) these two quantities cannot have simultaneous reality. Consideration of the problem of making predictions concerning a system on the basis of measurements made on another system that had previously interacted with it leads to the result that if (1) is false then (2) is also false. One is thus led to conclude that the description of reality as given by a wave function is not complete.

1.

ANY serious consideration of a physical theory must take into account the distinction between the objective reality, which is independent of any theory, and the physical concepts with which the theory operates. These concepts are intended to correspond with the objective reality, and by means of these concepts we picture this reality to ourselves.

In attempting to judge the success of a physical theory, we may ask ourselves two questions: (1) "Is the theory correct?" and (2) "Is the description given by the theory complete?" It is only in the case in which positive answers may be given to both of these questions, that the concepts of the theory may be said to be satisfactory. The correctness of the theory is judged by the degree of agreement between the conclusions of the theory and human experience. This experience, which alone enables us to make inferences about reality, in physics takes the form of experiment and measurement. It is the second question that we wish to consider here, as applied to quantum mechanics.

Whatever the meaning assigned to the term *complete*, the following requirement for a complete theory seems to be a necessary one: *every element of the physical reality must have a counterpart in the physical theory*. We shall call this the condition of completeness. The second question is thus easily answered, as soon as we are able to decide what are the elements of the physical reality.

The elements of the physical reality cannot be determined by *a priori* philosophical considerations, but must be found by an appeal to results of experiments and measurements. A comprehensive definition of reality is, however, unnecessary for our purpose. We shall be satisfied with the following criterion, which we regard as reasonable. *If, without in any way disturbing a system, we can predict with certainty (i.e., with probability equal to unity) the value of a physical quantity, then there exists an element of physical reality corresponding to this physical quantity*. It seems to us that this criterion, while far from exhausting all possible ways of recognizing a physical reality, at least provides us with one

di realtà fisica corrispondente ad essa), *completezza della teoria* (ogni elemento di realtà fisica deve avere una controparte nella teoria fisica) e *località* (ogni azione su un sistema non può cambiare la realtà fisica su un altro sistema separato spaziotemporalmente dal primo), Einstein, Podolsky e Rosen (denominati poi brevemente Epr) misero in luce un paradosso, arrivando così alla conclusione che la meccanica quantistica fosse una teoria incompleta. L'elemento chiave adottato dai tre fisici per sostenere l'incompletezza della teoria quantistica era un concetto assente in fisica classica, ma in grado di descrivere perfettamente alcune correlazioni quantistiche: l'*entanglement*. Il termine entanglement fu

introdotto per la prima volta da Erwin Schrödinger proprio nel 1935 in un articolo in cui apparve anche il famoso paradosso del gatto (vd. Asimmetrie n. 12 p. 14, ndr). L'entanglement (in italiano, aggrovigliamento) consiste in una correlazione non locale tra sottoinsiemi dello stesso sistema fisico, che non ha alcun analogo classico, e che contraddice i principi di realtà e località assunti da Einstein, Podolsky e Rosen e caratterizzanti la teoria classica. Al fine di completare la meccanica quantistica e quindi di ripristinare il principio di realtà, che sembrava venir meno, fu ipotizzato che il risultato delle misure effettuate su tali sistemi quantistici (in seguito detti *entangled*) fosse

determinato *a priori* da variabili nascoste locali: le cosiddette *local hidden variables*. Secondo tale modello, la massima conoscenza dello stato del sistema si avrebbe attraverso il valore di una serie di variabili in grado di determinare con certezza l'esito di una misura. Le nostre possibilità sperimentali non consentono però di conoscere il valore assunto da queste variabili, che pertanto vengono definite "nascoste", ma di determinarne solo una distribuzione di probabilità. Il dibattito fra i sostenitori della meccanica quantistica e i "seguaci" di Epr si sviluppò nei decenni seguenti, mantenendo la sua natura puramente astratta e l'introduzione della teoria a variabili nascoste venne considerata una speculazione filosofica piuttosto che una teoria fisica alternativa. È solamente nell'*annus mirabilis* 1964 che John Bell, ricercatore teorico in fisica delle particelle presso il Cern, sviluppò un metodo formale per verificare se ci fosse compatibilità

o meno fra le previsioni della meccanica quantistica e le teorie a variabili nascoste. Al fine di confutare il paradosso di Einstein, Podolsky e Rosen, Bell dimostrò che una teoria a variabili nascoste non era in grado di riprodurre alcune predizioni della meccanica quantistica associate agli stati entangled. In particolare, Bell introdusse una disuguaglianza soddisfatta dalle correlazioni di due sottosistemi per qualunque teoria fisica a variabili nascoste locali e propose un metodo sperimentale, per verificare se il mondo è effettivamente realistico e locale nel senso di Epr oppure, se sfruttando l'entanglement, è possibile confutare l'esistenza delle teorie a variabili nascoste. L'esperimento proposto si basa sulla generazione di coppie di particelle entangled, che vengono inviate a due diversi siti, chiamati per convenzione Alice e Bob (vd. approfondimento). I risultati delle misure che Alice e Bob effettuano ciascuno sulla propria particella vengono poi messi in relazione e, al

[as] approfondimento

Disuguaglianza alla prova



Coppie di fotoni entangled possono essere generate eccitando un cristallo particolare, detto *non lineare*, con un fascio di fotoni, tipicamente ultravioletti, molto intenso. All'interno del cristallo, alcuni fotoni del fascio possono dividersi in coppie di fotoni, che si trovano in stati di polarizzazione correlati tra loro e risultano quindi entangled. I due fotoni vengono quindi inviati rispettivamente ad Alice e Bob. Alice osserva la polarizzazione del fotone ricevuto in due possibili misurazioni, denominate A_1 o A_2 . La scelta di

quale misurazione effettuare è casuale e dunque non può essere influenzata da Bob, essendo i due sperimentatori lontani spazio-temporalmente. La misurazione effettuata da Alice è *dicotomica*, ovvero con due possibili risultati (raffigurati con verde o rosso). La misurazione A_1 ha come possibili esiti una polarizzazione orizzontale (ad esempio, verde) o una polarizzazione verticale (rosso). La misurazione A_2 ha invece come possibili esiti una polarizzazione a $+45^\circ$ (verde) oppure a -45° (rosso). Allo stesso modo Bob

osserva la polarizzazione del suo fotone con due possibili misurazioni B_1 e B_2 , con direzioni intermedie rispetto a quelle delle misurazioni adoperate da Alice. Successivamente, Alice e Bob confrontano i risultati ottenuti, in modo da verificare se sono correlati o scorrelati. Dai dati sperimentali si misura il grado di correlazione, che per una teoria a variabili nascoste dovrebbe essere minore di una quantità fissata dalla disuguaglianza di Bell, mentre risulta maggiore di questa quantità per gli stati entangled.



C.
Alain Aspect che, assieme a Grangier e Rogers, diede la verifica sperimentale definitiva della disuguaglianza di Bell nel 1982 nei laboratori di Orsay.

fine di confermare la validità della teoria realistica e locale classica, devono rispettare la disuguaglianza matematica introdotta da Bell.

La formulazione di tale disuguaglianza matematica ha rappresentato la chiave di volta rispetto alle discussioni sulla completezza della teoria quantistica, e la dimostrazione sperimentale della violazione della disuguaglianza di Bell ha confermato ulteriormente la validità della meccanica quantistica. I primi esperimenti su particelle entangled risalgono ai primi anni '80 e sono stati effettuati nei laboratori di Orsay (nei

pressi di Parigi) dai fisici Alain Aspect, Philippe Grangier e Gérard Rogers. In questi esperimenti gli stati quantistici entangled venivano generati attraverso i metodi dell'ottica non lineare e della fisica atomica, come fasci laser e nubi di atomi intrappolati. La violazione delle disuguaglianze di Bell venne dunque verificata, con l'assunzione di alcune ipotesi di natura pragmatica, derivanti dalle inevitabili imperfezioni sperimentali, dimostrando così che i modelli a variabili nascoste locali non sono compatibili con le osservazioni sperimentali. Sotto tali ipotesi le predizioni della meccanica

quantistica si sono rivelate corrette e hanno dato luogo allo sviluppo di una nuova branca della ricerca fisica chiamata *informazione quantistica* (vd. Asimmetrie n. 12 p. 10, ndr). Bisogna notare, comunque, che a causa delle limitazioni presenti in tutti gli esperimenti condotti sino ad oggi sono necessarie una o più assunzioni, estremamente plausibili ma supplementari, nella violazione delle disuguaglianze di Bell. Oggi, in diversi laboratori di tutto il mondo si cerca dunque di ottenere un esperimento del tutto conclusivo (il cosiddetto *loophole free Bell test*).

Biografia

Fabio Sciarrino è ricercatore universitario presso il Dipartimento di Fisica della Sapienza, Università di Roma. La sua attività di ricerca si incentra sull'informazione quantistica e i fondamenti della meccanica quantistica. Dal 2012 è *principal investigator* di un progetto europeo Erc su 3D-Quantum Integrated Optical Simulation (www.3dquest.tu). Ha ricevuto diversi riconoscimenti, fra cui la "Medaglia della Presidenza della Repubblica" associata al premio "Le Scienze per la Fisica".

Link sul web

<http://www.youtube.com/user/thequbitlab>

http://prola.aps.org/abstract/PR/v47/i10/p777_1

[as] intersezioni

Attacco al nucleare italiano.

di Marco Pivato

giornalista e autore del libro "Il miracolo scippato" (ed. Donzelli)

a.
Felice Ippolito (a destra) ed Edoardo Amaldi (a sinistra), uno dei padri fondatori dell'Infn, durante una visita alla Villa Farnesina di Roma, sede dell'Accademia dei Lincei.

Nel 1964 avvenimenti, accertati dalla magistratura e dalla storiografia disponibile, raccontano l'attacco fatale all'industria italiana dedita alla produzione di energia nucleare, fino al 1965 la terza nel mondo (in termini di produzione lorda e potenza installata, dietro solo a Gran Bretagna e Stati Uniti). Un attacco, in realtà, effetto collaterale di un altro, frontale, ovvero quello inferto ai soggetti, da Edoardo Amaldi a Felice Ippolito, che il nucleare italiano l'avevano fondato nel dopoguerra. È proprio Amaldi a introdurre Ippolito, di formazione ingegnere e dal 1950 docente di geologia applicata all'Università di Napoli, nella fucina della nuova fisica italiana. In quegli anni l'industria dell'energia nucleare muove i primi passi per iniziativa del Centro Informazioni Studi ed Esperienze (Cise), promosso nel 1946 a Milano da alcuni grandi gruppi privati. Divenuto segretario generale del Comitato Nazionale per l'Energia Nucleare (Cnen) – ente evoluto dal Cise, dedito all'allora prospera industria nucleare italiana, e dal quale si costituirà in seguito l'Infn – il 3 marzo 1964 Ippolito viene arrestato per presunte irregolarità amministrative. Per ricostruire le dinamiche che sottendono la caduta di Ippolito, bisogna tornare a qualche anno prima, quando nel 1962 va a buon fine la nazionalizzazione del settore elettrico, con la riforma che contemporaneamente istituisce Cnen ed Enel (Ente Nazionale per l'Energia Elettrica) e che assorbe tutte le aziende elettroproduttrici pubbliche e private, come, per esempio, Finelettrica, Sade ed Edison. Si tratta di un progetto caldeggiato da tempo dalle sinistre, ma reso possibile solo, durante il quarto governo Fanfani, grazie alla linea di collaborazione con l'area progressista, meditato dal segretario della Democrazia Cristiana (Dc) Aldo Moro. È un'operazione che però non va giù a diversi portatori di interessi, *in primis* proprio le imprese private che si vedono sottrarre il monopolio del



settore elettrico. Ai vertici dell'Enel sono nominati gli stessi ex dirigenti delle citate aziende, come Arnaldo Maria Angelini, ex vicepresidente di Finelettrica, che diventa direttore di Enel, e che se hanno mal digerito la nazionalizzazione tollerano ancora meno la spartizione delle risorse con il Cnen. I rapporti tra i due enti divengono estremamente tesi. Le due nuove istituzioni, che avrebbero dovuto collaborare (il Cnen porta energia elettrica da energia nucleare e l'Enel la distribuisce), si fanno tesi per la pretesa dell'Enel di imporre le proprie politiche economiche su tutta la filiera. Della *querelle*, a partire dall'estate 1963, comincia a discuterne la stampa. Seguirà, infatti, una raffica di note dell'agenzia di stampa del Partito Socialista Democratico Italiano (Psdi), nelle quali il segretario Giuseppe Saragat – dell'idea che il nucleare dedicato solo a scopi civili e non militari equivale a “una segheria che produce solo segatura” – attacca il Cnen, annunciando che avrebbe personalmente “vigilato” sull’“ossessione dell’energia atomica” e sullo “sperpero di pubblico denaro”. Il caso del presunto “sperpero di pubblico denaro” da parte del Cnen è ripreso dai maggiori quotidiani di allora, poi approda prima in Parlamento, infine in Procura. Al termine delle inchieste Ippolito è processato e condannato a una pena detentiva, pecuniaria e all'interdizione perpetua dai pubblici uffici, anche se, dopo due anni di prigione, riceverà la grazia proprio da Saragat, divenuto, nel frattempo, Presidente della Repubblica. Ma già prima, quando è Indro Montanelli a seguire la cronaca per il Corriere della Sera, appare chiaro che il caso Ippolito poco ha a che fare con gli interessi scientifici e l'energia nucleare: la battaglia muove dalle faide interne alle forze politiche – le correnti “progressiste” della Dc contro quelle “conservatrici” e fobiche per l'apertura al centrosinistra – e dal polverone seguito alla nazionalizzazione. Dalla parte di Felice Ippolito si schiera l'Europa, con il presidente della Commissione dell'Euratom Etienne Hirsch, che al governo italiano non fa mancare di notare la stima internazionale che il Cnen aveva assunto sotto la guida del suo segretario. Simile posizione è espressa nell'indignato appello che sessantacinque fisici

accademici italiani lanciano a favore di Ippolito in una lettera al Tribunale, sottolineando come in quegli anni “il Cnen ha salvato il prestigio scientifico del Paese” e come “le somme impegnate nella ricerca hanno avuto un rendimento [...] maggiore di quello ottenuto in ogni altro Paese”. Ma l'epilogo più efficace del caso Ippolito forse lo scrive Sergio Romano: “Quando ebbi occasione di lavorare con Saragat, giunsi alla conclusione che il leader dei socialdemocratici aveva dato troppo ascolto a qualche interessato consigliere e si era convinto che Felice Ippolito sarebbe diventato, come Enrico Mattei, uno zar dell'energia [...]. Allorché divenne presidente della Repubblica qualcun altro, per fortuna, dovette spiegargli che era ora di chiudere quella vicenda”.

b.
Il 3 marzo 1964, la Procura generale di Roma arresta Felice Ippolito, con l'accusa di peculato aggravato continuato, falso in atto pubblico e abuso di poteri d'ufficio. Il giorno seguente la notizia dell'arresto campeggia sulla prima pagina del Corriere della Sera.



[as] con altri occhi

Nelle particelle dell'arte.

di Michele Cossyro

scultore, pittore, ceramista, mosaicista

Mi è sempre piaciuto guardare agli sviluppi storici dell'arte e della scienza in generale, e della fisica in particolare, come a un *unicum* indivisibile. Di tutte le scienze, la fisica ha un rapporto strettissimo con l'arte, poiché, nel creare, un artista non può non considerare le leggi fisiche che governano il mondo. Difatti, nel collocare un'opera scultorea, l'artista deve tener conto del peso e del baricentro per calcolare un'adeguata struttura portante e un sostegno adeguato, oltre alla specificità dei diversi materiali che incidono moltissimo sulle sue scelte creative. Per questo motivo credo che si possa rileggere

la storia dell'arte attraverso il suo rapporto stretto con la fisica. Guardando agli inizi del XX secolo, per esempio, possiamo vedere come gran parte della produzione artistica sia legata alla conoscenza scientifica: è interessante notare come nel periodo in cui l'arte viene messa in completa discussione dalle avanguardie, Einstein fa lo stesso con la sua teoria della relatività. Da quel momento in poi le scoperte della fisica e le nuove conoscenze scientifiche coinvolgeranno sempre di più la creatività artistica. Negli anni Quaranta, con la nascita dello *spazialismo*, Lucio Fontana respinge il concetto di rappresentazione,

a.
Lo scultore Michele Cossyro con la sua opera *Buco nero*.





b.

La medaglia al bosone di Higgs, creata da Michele Cossyro per l'Aiam (Associazione Italiana dell'Arte della Medaglia), in mostra a Roma al Vittoriano in *Suggestioni in metallo: l'arte della medaglia tra Ottocento e modernità* nel dicembre 2013.

presentandoci per la prima volta una realtà post-atomica e subatomica, riuscendoci a portare con i suoi *Concetti spaziali* e, in generale, con i suoi *tagli* verso una visione "altra" dello spaziotempo, verso una nuova dimensione. Dopo di lui si è proseguito a restringere o allargare le superfici bucate, ma non si è andato oltre. Le sue intuizioni sono rimaste sospese forse in attesa che le scoperte della fisica ci dessero nuovi stimoli. La fisica delle particelle ha dato vita, e continua a dare vita ogni giorno, a nuove scoperte. Stimolata da questi eventi, la mia ricerca artistica, ormai da diversi anni, trae spunto e sviluppa alcune tematiche legate alle ricerche della fisica delle particelle, che mi arricchiscono sempre di più, producendo in me entusiasmo e ispirazione.

Il mio lavoro non pretende valenza scientifica né è mera illustrazione, ma è il lavoro di un artista che, documentandosi con umiltà, si accosta con rispetto alle problematiche scientifiche, con la sua fantasia sfrenata e sicuramente un po' d'incoscienza.

Forse proprio in virtù di questo mio osare l'impossibile, quello che fantastico e immagino spesso esiste e corrisponde alla realtà delle cose. Nei miei lavori la superficie di rappresentazione non esiste più, lo spazio si è dilatato, la parete è un campo d'azione, dove ogni accadimento, lo spazio e il tempo s'intersecano, presentando frantumazioni, segni, disegni, particelle e frammenti.

All'inizio, nei primi anni '70, le mie opere affrontavano i temi dell'*alga mater*, della luce e del suo inquinamento, del pulviscolo atmosferico, del mondo invisibile e dei microrganismi. Negli anni successivi alcuni dei temi principali della mia poetica sono state le *disseminazioni* e le *frantumazioni di particelle*, seguite dalle *derivazioni stellari*, dalle *scorie* e dall'indagine sugli *abissi* sia marini che siderali. Le mie opere hanno una doppia valenza estetica e metaforica, e sono proprio questi oggetti di studio mutuati dalla fisica (le scorie, i buchi neri, la materia oscura), che io utilizzo per denunciare il terribile momento che sta attraversando la nostra società.

Negli ultimi decenni, parallelamente alle ricerche della fisica, mi hanno affascinato i buchi neri e sono stato attratto dalla teoria delle stringhe e, quando nel 2013, mi hanno chiesto di creare la medaglia celebrativa per i 50 anni dell'Aiam (Associazione Italiana dell'Arte della Medaglia), ho voluto da subito dedicarla al bosone di Higgs, come omaggio a una delle scoperte più importanti del nostro tempo.

Attualmente, il mio interesse è rivolto, oltre al bosone e ai buchi neri, anche alle particelle di materia oscura e le ultime opere che sto realizzando sono quelle che ho chiamato *pieghe cosmiche* in ceramica su un supporto ligneo. Per me la fisica contemporanea è un continuo stimolo a guardare oltre e avere fiducia nel futuro.

[as] spazi

Balle di scienza.

di Vincenzo Napolano

Da Galileo in poi, di affermazioni rivelatesi sbagliate, gli scienziati – anche i più grandi – ne hanno fatte parecchie. Sicuramente molte di più di quelle che alla prova dei fatti sono risultate consistenti e vere. Raccontare le storie di errori e colpi di fortuna, abbagli e intuizioni talvolta utili, anche se sbagliate, vale la pena, per consentire al grande pubblico di gettare uno sguardo sul procedere potente e al contempo fragile della conoscenza. L'Infn lo fa a Pisa, fino al 29 giugno, in occasione del 450° anniversario dalla nascita di Galileo, con la mostra *Balle di Scienza. Storie di errori prima e dopo Galileo*.

La mostra racconta, ad esempio, che non è vero che esiste una generazione spontanea della vita e nemmeno che il fuoco libera un misterioso elemento chiamato *flogisto*, come la scienza sostenne ai suoi albori. È falso che i movimenti dei continenti sulla superficie della Terra siano dovuti all'espansione della Terra o che l'uomo sia l'anello finale della catena evolutiva, come molti scienziati hanno creduto e sostenuto a lungo. Non esiste l'etere luminifero – idea balenata a più riprese nella storia della scienza moderna, per evitare quello che sembrava allora impossibile, ma che invece oggi è il fondamento della fisica moderna, ossia che la luce si propaga nel vuoto. E – per arrivare ai giorni nostri – i neutrini non viaggiano più veloci della luce, ipotesi discussa per mesi, pochi anni fa, dai fisici di mezzo mondo. E il catalogo delle *Balle di Scienza* potrebbe allungarsi ancora molto e toccare tutte le epoche della scienza moderna. Il mito, però, che gli scienziati siano infallibili – o quasi – stenta a morire e la scienza che sbaglia continua a fare scandalo. È vero che il metodo scientifico (che, generalmente, si fa risalire a Galileo Galilei) è lo strumento più efficace immaginato finora dall'uomo, per raggiungere qualche certezza oggettiva



a.
Immagine satirica sull'inoculazione del vaccino da parte di Edward Jenner (incisione di James Gillray).

sul mondo esterno e su se stesso. Formulando teorie e modelli gli scienziati esprimono le loro idee sulla realtà, che poi verificano (o falsificano) con i fatti degli esperimenti. E infine rendono pubbliche tutte le fasi del loro lavoro, così che altri esperti possano valutarne la correttezza.

Questo processo rigoroso, condotto con fatica e umiltà, garantisce agli scienziati di accorgersi dei propri errori e, al contempo, regala loro la grande libertà di poter sbagliare. Di immaginare cioè soluzioni considerate impensabili, esperimenti mai prima realizzati o teorie impossibili. Quasi sempre si accorgeranno di essere finiti fuori strada, ma quell'unico tentativo andato a segno ripagherà dei molti andati a vuoto, segnando nuovi traguardi della conoscenza. Gli errori sono non solo utili, ma addirittura indispensabili al progredire della scienza. E utile è anche qualche volta il caso, come dimostrano le scoperte per serendipità, arrivate cioè fortuitamente, mentre si è impegnati alla ricerca di tutt'altro.

Se Galileo segna uno spartiacque, dopo il quale abbiamo imparato un metodo per accorgerci quando sbagliamo, non possono

mancare gli errori e le balle antiche. Anche se alla luce dei nostri errori moderni probabilmente impareremo a essere un po' più indulgenti verso i nostri antenati. Scopriremo, ad esempio, che il modello planetario di Tolomeo – per quanto sbagliato – testimonia un metodo di osservazione e una capacità di sintesi matematica estremamente avanzate, che riscoperte secoli dopo saranno decisive per la nascita della scienza moderna. Così come lo furono la magia e l'alchimia dell'epoca medioevale che, pur tra molti abbagli e superstizioni, aspiravano a rendere utile il sapere filosofico e scientifico tradizionale e a trovarne delle applicazioni, che oggi chiameremmo tecnologiche.

Oggi del resto il sapere e la scienza non sono più appannaggio di una casta di sacerdoti o di una ristretta cerchia di dotti, ma sono universali, potenzialmente accessibili a tutti. Anche i grandi media ci raccontano la scienza e può diventare difficile distinguere tra gli errori di scienza – commessi in buona fede – e le balle, questa volta, vere e proprie. Ci serve allora più che mai tenere a mente la lezione di Galileo: sbagliarsi è inevitabile, mentire inaccettabile.

[as] approfondimento

La mostra

La mostra *Balle di Scienza. Storie di errori prima e dopo Galileo*, promossa dall'Infn, dall'Università di Pisa, dalla Scuola Normale Superiore e dal Palazzo Blu, dove è allestita (Lungarno Gambacorti 9, Pisa), curata da Franco Cervelli e Vincenzo Napolano, racconta gli abbagli, le cantonate gli errori, fatti dall'uomo nel suo sforzo di conoscere e interpretare il mondo. Il percorso espositivo è ricco di exhibit e installazioni interattive. Giochi e illusioni ottiche ci inducono a riflettere su cosa siano e cosa intendiamo per vero e falso. Mentre i racconti multimediali e le scenografie video faranno prendere vita alle storie degli errori e delle scoperte per caso. La mostra è corredata di un'offerta di laboratori didattici per le scuole dalle elementari alle superiori.

Per informazioni: www.infn.it/comunicazione

Balle di Scienza

Storie di errori
prima e dopo Galileo

PISA — PALAZZO BLU
22 MARZO - 29 GIUGNO 2014



[as] traiettorie

On the road.

di Eleonora Cossi



a.
“C'è sempre qualcosa di più, un po' più in là... non finisce mai.” – *On the road*, Jack Kerouac

“Immagina che una grande società, ad esempio un'azienda attiva nel settore tecnologico, decida di ampliare il proprio business aprendosi ai mercati emergenti o introducendo nuove linee di prodotti. Una sfida economica complessa a cui concorrono molteplici fattori – economici, normativi e sociali – che, a seconda di come vengono valutati e affrontati, possono portare al successo o viceversa a epiloghi poco gratificanti. Quello che serve a quest'azienda è un'efficace strategia di business: è qui che entra in campo il mio team”. Alessandro Palma lavora dal settembre 2013 in una grande azienda internazionale di consulenza che ha base negli Stati Uniti, la Boston Consulting Group, per la quale si occupa di “consulenza strategica di business”: una professione tanto impegnativa quanto gratificante. Per intervistarlo ci siamo dati un appuntamento via Skype alle sei di mattina, ora della costa orientale degli Stati Uniti.

Alessandro [A]: Le società di consulenza sono realtà molto affermate nel panorama economico globale. La loro funzione è aiutare le aziende a investire, innovare, individuare nuove opportunità o ristrutturarsi, offrendo una consulenza di tipo manageriale e strategico, che spesso arriva dopo un periodo di “osservazione in loco”. Funziona così: un team di consulenti viene inviato in azienda per trascorrervi qualche mese. Si tratta di un periodo di osservazione cruciale, sulla base del quale viene poi redatta un'analisi che servirà a indirizzare l'azienda nel raggiungimento dei suoi obiettivi. Io faccio parte di questo team. È un lavoro estremamente stimolante, che porta continuamente ad affrontare nuove sfide.

b.

Alessandro Palma, 31 anni e un dottorato in fisica, lavora negli Usa come consulente strategico per la Boston Consulting Group. Dal 2010 collabora come volontario con la onlus "Prize4Life" che sostiene la ricerca sulla Sclerosi Laterale Amiotrofica (Sla).



[as] Una sorta di esploratore contemporaneo... Ma a cosa serve un dottorato in fisica sperimentale per svolgere un lavoro del genere? Che legame c'è tra l'analisi dei primi dati di Cms e lo *strategic business*?

[A]: Attraverso la mia formazione di fisico ho interiorizzato una serie di competenze importanti che poi ho messo in pratica nella mia professione attuale. Dopo la laurea ho vinto la borsa di dottorato in fisica all'Università La Sapienza di Roma. Il mio lavoro riguardava l'analisi dei primi dati dell'esperimento Cms del Large Hadron Collider (Lhc): un compito dove rigore analitico e chiarezza sono elementi fondamentali per modellizzare il problema che si sta affrontando. Si parte dagli elementi di base per elaborare modelli quantitativi complessi: un approccio vincente sia nella fisica delle particelle sia nell'analisi strategica! Un altro aspetto importante, che ho maturato nella ricerca scientifica, riguarda lo strutturare il ragionamento per ipotesi. Lavorando all'analisi dei dati di Lhc, mi sono trovato a confrontarmi con una mole di informazioni impressionante, una quantità tale che molto si avvicina alla metafora dell'ago nel pagliaio. È solo adottando una strategia di ragionamento adeguata e rigorosa che ci si riesce a non perdere, e questa strategia consiste appunto nel procedere verificando e falsificando ipotesi, per identificare la strada da percorrere. Che si tratti di un sentiero o di un'autostrada, l'importante è procedere nella direzione giusta!

[as] E senza perderti tu hai girato parecchio. Un fisico on the road...

[A]: In effetti nell'ultimo anno mi sono spostato molto. Dal 2011 al 2013 ho frequentato un Mba (Master in Business and Administration) presso la Harvard Business School negli Stati Uniti, grazie al quale ho avuto l'opportunità di essere selezionato per due *internship* (periodi di tirocinio): uno a Chicago, presso una banca di investimento, e uno a Rio de Janeiro, in Brasile, presso una società di *venture capital* che investe in società innovative. Un'escursione termica e culturale notevole.

[as] Ma questo viaggio professionale è partito dall'Italia, da Roma.

[A]: Sì, stavo ancora finendo il dottorato quando ho cominciato a lavorare in Enel: è stata la mia prima esperienza fuori dall'ambito della fisica, in cui però le competenze acquisite nella mia formazione scientifica, in particolare la fluidodinamica, sono state fondamentali. Ho lavorato per un anno con base a Catania, come figura tecnica di supporto allo sviluppo di progetti eolici e fotovoltaici. In seguito c'è stata una transizione professionale e mi è stata offerta un'opportunità in un ruolo legato al business, con base a Roma. È stato in quel momento che ho capito che era quella la strada che volevo percorrere e il gruppo di ricerca con cui collaboravo mi ha fornito il supporto e l'incoraggiamento necessari per finalizzare il lavoro di tesi in quella fase di transizione.

[as] illuminazioni

Una partita a quark.

Quark e leptoni, e ancora elettroni, muoni e neutrini... parole che possono suonare incomprensibili all'orecchio dei non addetti ai lavori. E invece non si tratta solo di roba da fisici, ma anche di alcune delle sessantasei carte che compongono il mazzo del gioco *Quark Matter*, ideato dai due inventori ungheresi adolescenti, Csaba Török e Judit Csörgő, con la supervisione del papà Tamás Csörgő, ricercatore presso l'esperimento Totem del Cern di Ginevra.

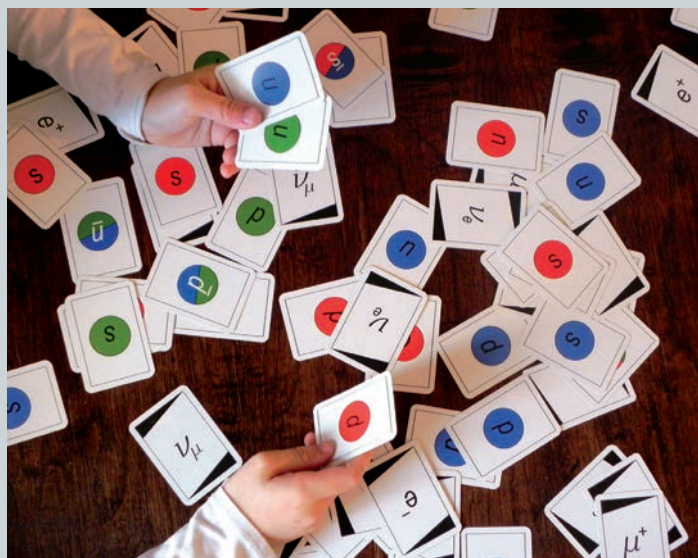
Con sei diversi giochi di carte (*ANTI*, *Quark matter*, *Riveliame le particelle!*, *Sciami cosmici*, *Memory della quark matter* e *Trova l'Higgs!*) è possibile entrare in contatto con il mondo dei principi della fisica delle particelle all'insegna del divertimento. E non solo, ad esempio, con *Trova l'Higgs!* i giocatori potrebbero anche arrivare a sentire lo stesso brivido provato dagli scienziati, quando hanno trovato l'ultimo elemento mancante del modello standard: il bosone di Higgs, la particella, la cui esistenza è stata ipotizzata nel 1964 da Robert Brout e dai recenti premi Nobel François Englert e Peter Higgs e verificata sperimentalmente ben quarantotto anni dopo dai ricercatori dell'acceleratore Lhc del Cern.

Come si gioca? Semplice! In sostanza ogni carta di *Quark matter* rappresenta una delle particelle elementari conosciute oggi in natura e raggruppate nel modello standard, che le differenzia per proprietà statistiche e per le leggi fisiche cui obbediscono. Al tavolo da gioco è possibile dunque districarsi abilmente tra scelte di colore e carica

delle particelle della famiglia dei bosoni mediatori (che governano le interazioni) e di quella dei fermioni (che compongono la materia), divisa tra quark (up e down, charm e strange, top e bottom) e leptoni (elettrone, muone e tau e corrispondenti neutrino elettronico, muonico e tauonico), con le relative antiparticelle. Insomma, attraverso questo mazzo di sessantasei carte e sei possibili combinazioni di gioco, i principi base della fisica delle alte energie possono essere assorbiti naturalmente attraverso la concentrazione e la memoria visiva, tipiche del popolare gioco del Memory o della *suspense* e l'azzardo del poker.

Proprio come un lungo viaggio verso i più alti picchi del sapere, *Quark matter* porta grandi e piccini a scalare inaspettatamente l'ascesa dei diversi gradi della conoscenza della fisica particellare, partendo dai livelli più elementari (come poter distinguere i colori fondamentali, che è sufficiente per iniziare la partita). In conclusione, chiunque sia interessato a provare il brivido della scoperta scientifica, a saperne di più sulle catene di decadimento, i raggi cosmici e via dicendo e abbia un'età compresa tra i cinque e i novantanove anni è invitato a partecipare al "miglior gioco di carte del mondo!", come ha dichiarato il bambino ungherese Bazsika, quando sfidava a *Quark matter* i suoi compagni di classe nella scuola di Veszeg in Ungheria.

Chissà, forse non è proprio vero che "il gioco è bello quando dura poco". [Beatrice Bressan]



Per acquistare il gioco di carte:

<http://www.lulu.com/spotlight/Reszecskeskartya>

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

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

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



Per contattare
i laboratori dell'Infn:

Laboratori Nazionali di Frascati (Lnf)
T + 39 06 94032423
/ 2552 / 2643 / 2942
sislnf@lnf.infn.it
www.lnf.infn.it

Laboratori Nazionali del Gran Sasso (Lngs)
T + 39 0862 4371
(chiedere dell'ufficio prenotazione visite)
visits@lngs.infn.it
www.lngs.infn.it

Laboratori Nazionali di Legnaro (Lnl)
T + 39 049 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



www.infn.it

rivista online
www.asimmetrie.it