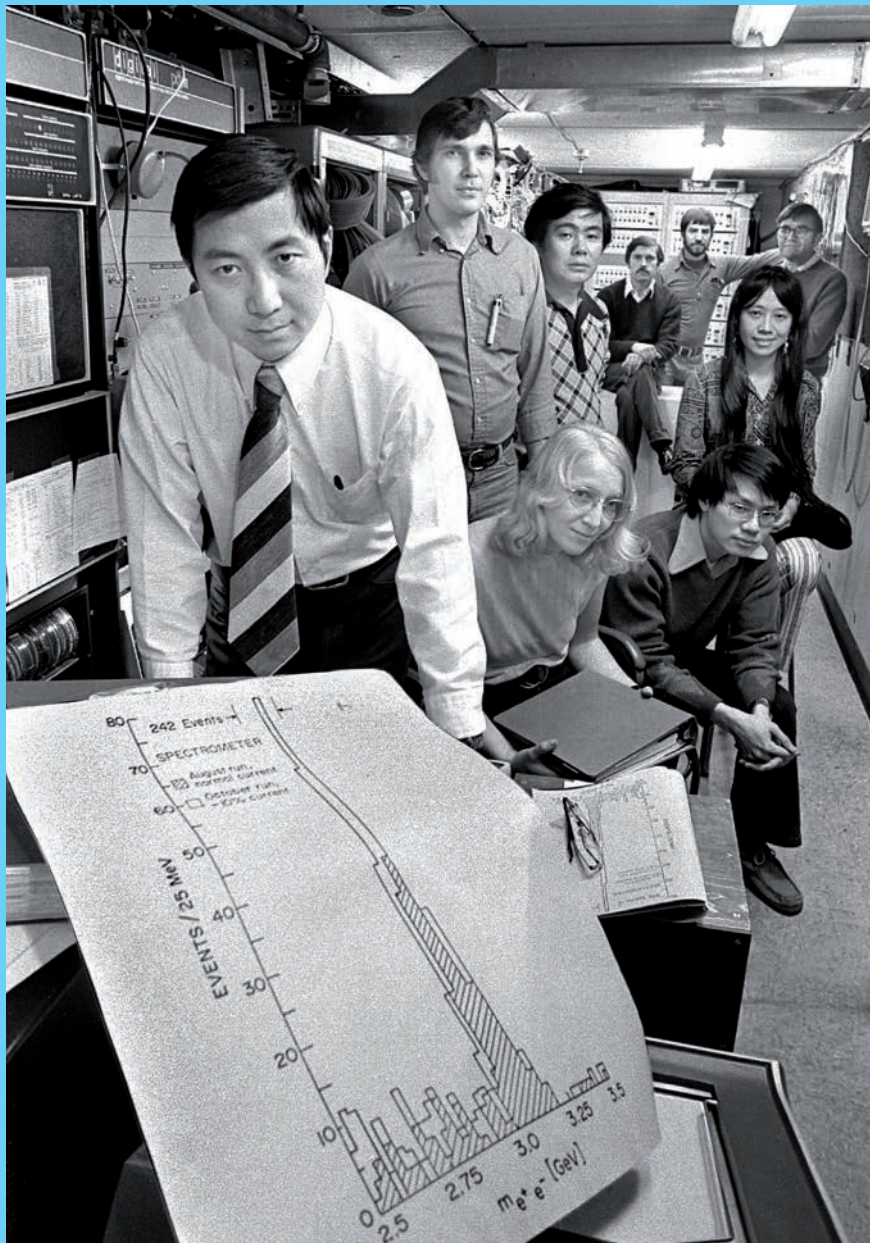


Fascino svelato

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).

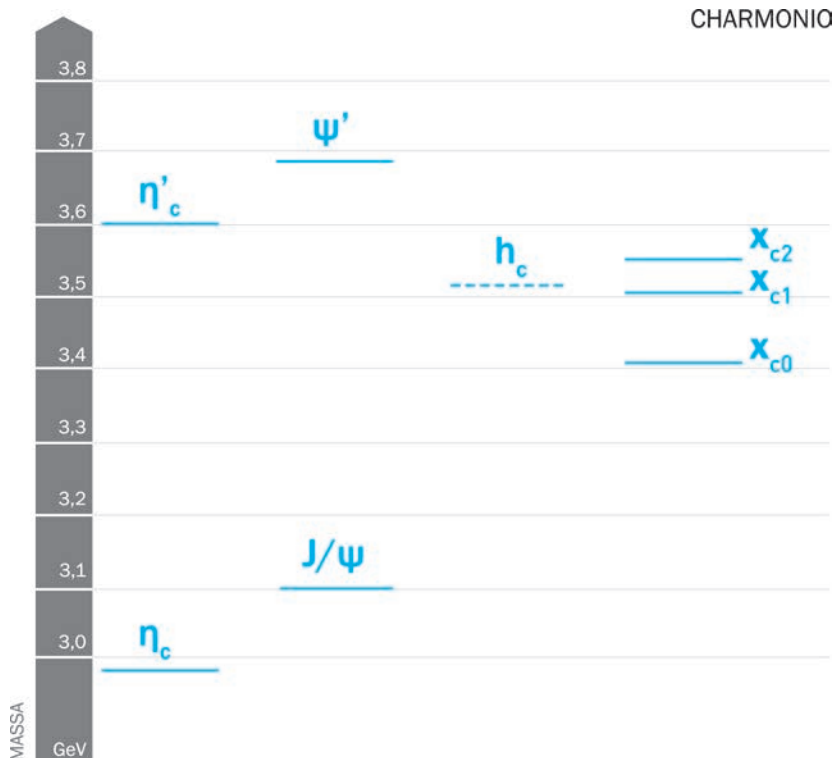
La scoperta del charm, nell'autunno del 1974, venne complicata da una incredibile

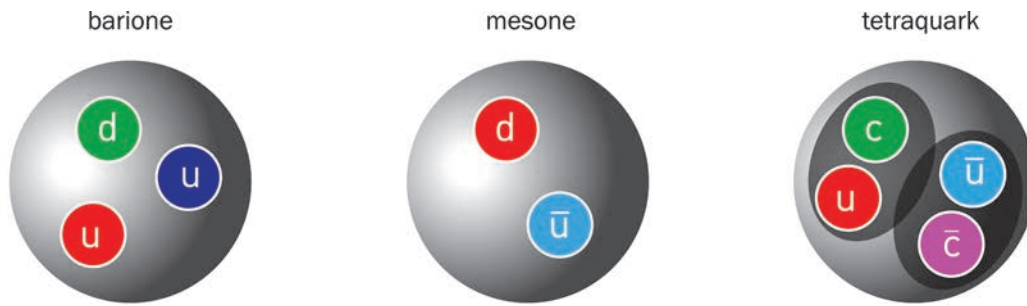
coincidenza: come si capì qualche mese dopo, nella stessa regione di energie esplorata a Stanford venivano prodotte coppie di un nuovo leptone pesante, il τ , la cui presenza (di cui all'inizio nessuno sospettava) alterava l'interpretazione dei dati sperimentali riguardanti il charmonio.

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.