

Bellezza asimmetrica

Violazione CP nell'esperimento Babar.

di Crisostomo Sciacca

Dal 1964 al 2001: dopo 37 anni viene finalmente trovato un secondo sistema nel quale si manifesta la violazione della simmetria CP. Questa volta gli attori non sono i K neutri (K^0), bensì i mesoni B neutri (B^0), particelle oltre cinque volte più pesanti del protone e composti da un quark down, con carica $-1/3$, e da un antiquark beauty, con carica $+1/3$. Vale l'opposto per l'anti- B^0 .

Questa scoperta ha visto la competizione di due gruppi sperimentali, Babar a Stanford in California, con una rilevante partecipazione dell'Infn, e Belle in Giappone. In ambedue i casi, è stato necessario costruire macchine acceleratrici dedicate, nelle quali elettroni e positroni collidono con energia complessiva di quasi 11 GeV, l'energia ottimale per creare le particelle denominate $Y(4S)$, formate da un quark e un antiquark di tipo beauty, che decade quasi istantaneamente generando una coppia di mesoni B^0 e anti- B^0 o una coppia di mesoni $B^+ B^-$, con quasi uguale probabilità. Il modo più chiaro per mettere in evidenza la violazione CP è quello di studiare il decadimento del B^0 con creazione di una particella J/ψ (coppia di quark e antiquark di tipo charm), assieme a un K^0 , in particolare quello a vita breve, il K_S . Questo processo è raro, ed è quindi obbligatorio raggiungere elevatissime intensità di collisioni: non a caso queste macchine vengono denominate *B factories*, cioè fabbriche di B.

Ma come si può mettere in evidenza se c'è violazione della simmetria CP, cioè se materia e antimateria si comportano in modo differente? Per rispondere alla domanda dobbiamo sottolineare alcuni aspetti legati al mondo sorprendente della meccanica quantistica. Innanzitutto, la coppia di mesoni B^0 creati dal decadimento della particella $Y(4S)$ allontanandosi dal punto di creazione possono "cambiare natura": un B^0 può trasformarsi spontaneamente in un anti- B^0 (e viceversa). E, fatto ancor più misterioso, se uno dei due decide di trasformarsi, il secondo è costretto a mutarsi in senso opposto, allo stesso istante e a qualunque distanza essi si trovino: la loro esistenza è "intrecciata". Nel gergo dei fisici, questi due sorprendenti fenomeni vengono chiamati rispettivamente *mixing* ed *entanglement*, e sono la chiave per affrontare la violazione CP. Ma i "misteri" non finiscono qui: nella strategia di misura entra in gioco un'altra bizzarria della meccanica quantistica, l'interferenza tra decadimenti diversi che portano allo stesso stato finale. Va notato preliminarmente che sia il B^0 che l'anti- B^0 possono decadere nella coppia J/ψ e K_S .

Esaminiamo ora cosa accade al B^0 della coppia nata dal decadimento della $Y(4S)$ (discorso analogo vale per l'anti- B^0): esso può decadere nella coppia J/ψ e K_S o direttamente o dopo una sua trasformazione in anti- B^0 , cioè dopo un suo *mixing*. Ebbene, nel mondo dell'esperienza quotidiana diremmo che, se allo stesso risultato finale si può arrivare con due strade diverse, ciascuna caratterizzata da una certa probabilità di avverarsi, la probabilità complessiva si ottiene semplicemente "sommando" le due probabilità individuali. Tutt'altra storia in meccanica quantistica: la probabilità finale può essere minore, uguale o maggiore, nasce un "termine di interferenza" tra i due percorsi possibili, che può essere negativo, nullo o positivo a seconda dei casi!

E qui siamo al punto centrale della strategia di misura. La teoria ci dice che se vi è violazione CP questo curioso effetto è diverso a seconda che si studi il B^0 oppure l'anti- B^0 e, di conseguenza, il tempo di decadimento ne risente in maniera misurabile. Abbiamo ora gli ingredienti necessari, schematizzati nella fig. 1.

Naturalmente, il gioco è stato tutt'altro che semplice. Infatti, il ritardo tra i due decadimenti,

Strategia di misura

I passi sperimentali per la prima misura di violazione CP nei mesoni B neutri in Babar:

Dalla collisione di un elettrone a 9,0 GeV contro un positrone a 3,1 GeV nasce una particella denominata $Y(4S)$ che decade quasi istantaneamente.

La "scomparsa" della $Y(4S)$ lascia una coppia B^0 e anti- B^0 *entangled* (in blu e rosso), che viaggiano approssimativamente lungo la direzione che aveva l'elettrone prima dell'urto, visto che gli elettroni hanno energia assai superiore a quella dei positroni.

Decade uno dei due mesoni (la loro vita media è di circa 1,5 picosecondi, ovvero di millesimi di miliardesimo di secondo), lo chiameremo mesone "etichetta" (B_{tag}). L'altro lo chiamiamo mesone segnale (B_{CP}).

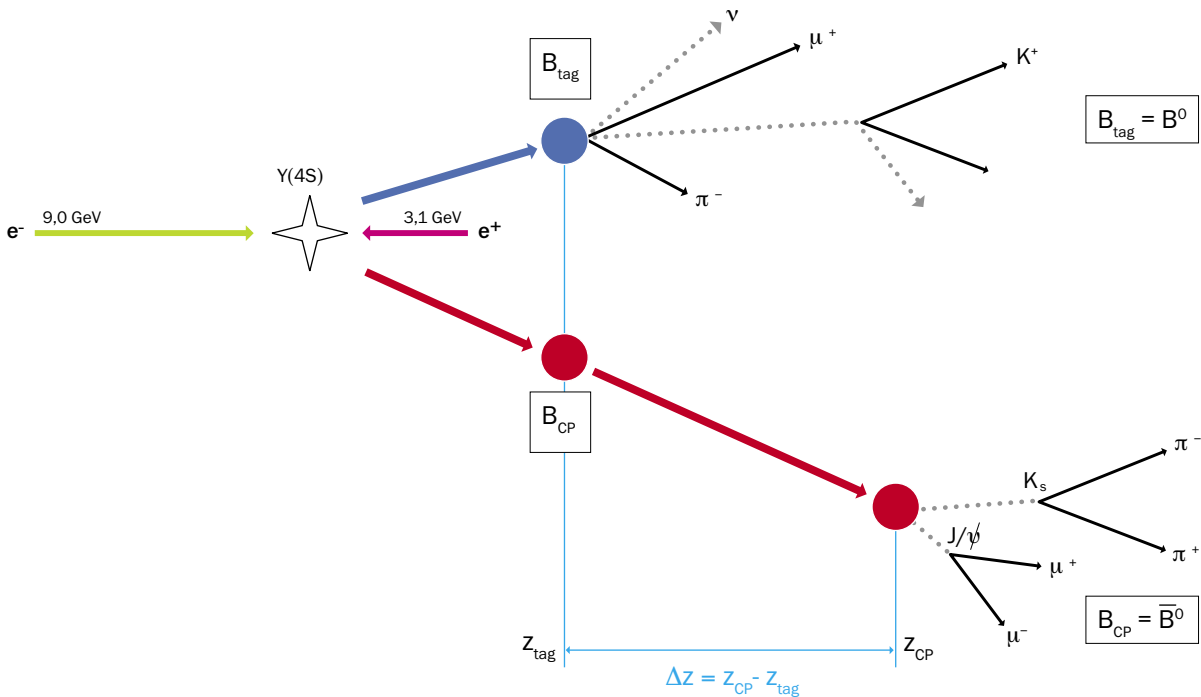
Si identificano le particelle prodotte nel decadimento del B_{tag} e, dai segni delle loro cariche elettriche, si capisce se esso era un B^0 oppure un anti- B^0 . L'entanglement ci assicura che, all'istante del decadimento del primo B^0 , il secondo era del tipo opposto.

In tempi sempre dell'ordine del picosecondo, decade anche il secondo mesone, il B_{CP} .

I modi di decadimento di B_{CP} sono numerosissimi, ma ne verranno selezionati solo alcuni particolarmente significativi, innanzitutto quello indicato in figura, con creazione di un K_s e di una J/ψ , che a loro volta decadono rapidamente in altre particelle, quelle che finalmente il rivelatore è in grado di "vedere".

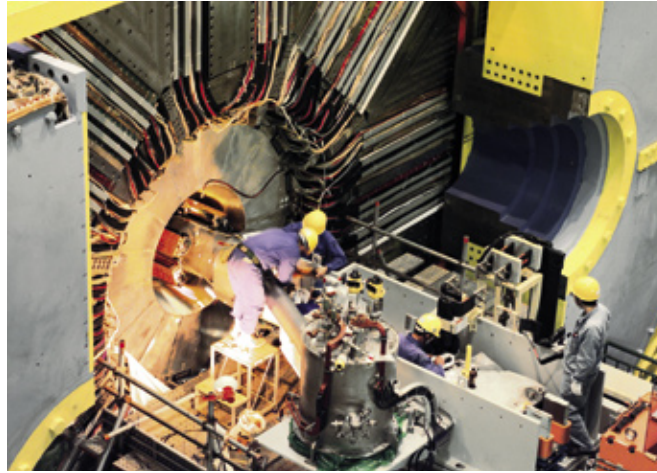
Raccogliamo almeno qualche centinaia di eventi in cui il B_{tag} sia un B^0 e altrettanti in cui sia un anti- B^0 . Per ciascun evento si registra la distanza tra i due punti di decadimento (Δz) di B_{tag} e di B_{CP} e, essendo nota la velocità (circa la metà della velocità della luce c), si ricava la differenza temporale tra i due decadimenti (il Δt), che è dell'ordine dei picosecondi.

Si costruiscono due grafici, ciascuno dei quali mostra la distribuzione degli eventi in funzione degli intervalli temporali Δt , misurati con tag B^0 e con tag anti- B^0 : se sono diversi, c'è violazione CP. E il risultato, raggiunto nel 2001, è inequivocabile: c'è violazione CP.

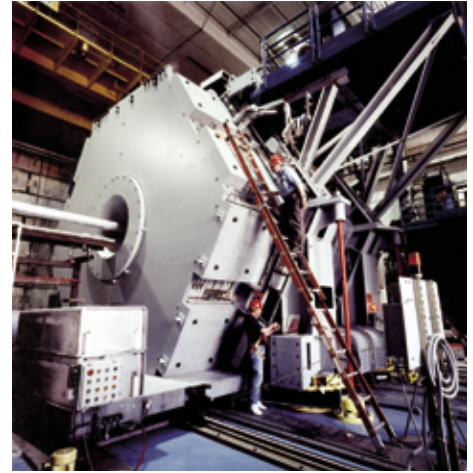


$$\Delta t \approx \Delta z / 0,56 c \approx 260 \mu\text{m} / 0,56 c \approx 1,5 \times 10^{-12} \text{s}$$

1.



a.



b.

il Δt della fig. 1, in realtà viene misurato attraverso la distanza tra i due “vertici” di decadimento, che distano alcune centinaia di micron, nota la velocità dei due B^0 , dell’ordine di metà della velocità della luce: per fare misure di così alta precisione, Babar ha costruito un complesso rivelatore di tracce (*tracciatore*), costituito da sensori di silicio che avvolgono il punto di collisione. Ma non basta: se il collisore fosse stato di tipo tradizionale, con due fasci della stessa energia, le distanze da misurare sarebbero ben al di sotto dei valori raggiungibili. Per risolvere il problema, sia l’acceleratore americano che quello giapponese hanno una caratteristica essenziale, sono due macchine “asimmetriche”, i due fasci hanno energie significativamente diverse, e di conseguenza i due B^0 viaggiano nel verso del fascio più energetico e i vertici di decadimento sono più lontani rispetto al caso di una macchina simmetrica. Il rivelatore Babar è stato costruito a strati concentrici, ciascuno con rivelatori diversi adatti a misurare ciò che emerge dalle collisioni (vd. fig. b).

Allontanandosi dal centro, si trova una camera a fili che misura le tracce delle particelle cariche, un rivelatore di elettroni e fotoni in grado di misurarne l’energia, un identificatore di particelle basato sull’effetto Cherenkov (vd. Asimmetrie n. 10, “Raggi cosmici”, settembre 2010, p. 29, ndr), uno speciale solenoide magnetico superconduttore (progettato e costruito in Italia) che curva le particelle cariche permettendone la misura dell’impulso, e un rivelatore per muoni all’interno degli strati di ferro che racchiudono l’apparato e raccolgono le linee di forza del campo magnetico.

Dal 2001, anno del primo risultato con i B neutri, sino a oggi sono state eseguite un gran numero di analisi utilizzando altri processi, anche con l’uso di B carichi. I risultati, numerosissimi, sono tra loro coerenti, confermano con straordinaria precisione le previsioni del modello standard e non danno adito a dubbi: i mesoni K non sono più soli, anche i B dimostrano che le interazioni deboli violano CP, provando che materia e antimateria hanno un comportamento diverso.

a.
Nel laboratorio giapponese Kek, l’esperimento Belle, come lo statunitense Babar, studia la violazione di simmetria CP dei mesoni B.

b.
L’esperimento Babar al collisore elettrone-positrone Pep II del laboratorio Slac di Stanford.

Biografia

Crisostomo Sciacca è professore di fisica all’Università “Federico II” di Napoli. Ha svolto la sua attività di ricerca in fisica delle particelle elementari nei Laboratori Nazionali di Frascati, al Cern e a Stanford nell’esperimento Babar.

Link sul web

www.slac.stanford.edu/BF/

www-public.slac.stanford.edu/babar/

Fisica del sapore in Lhc

Se i suoi fratelli maggiori, *Atlas*, *Cms* e *Alice*, "martellano" la materia che transita in Lhc alla ricerca di nuova fisica, l'esperimento *Lhcb* cerca di identificare le possibili, infinitesime anomalie che proprio la nuova fisica potrebbe causare nello studio della simmetria tra materia e antimateria. Come cercare un ago in un pagliaio. La struttura di *Lhcb* è profondamente differente da quella degli altri esperimenti di Lhc: i rivelatori di cui è composto sono tutti collocati da un lato rispetto al punto di collisione. E così, mentre gli altri sono interessati a osservare e rivelare ciò che accade nella *regione centrale*, *Lhcb* studierà i processi *in avanti*, cioè quelle collisioni in cui la maggior parte delle particelle vengono emesse lungo la direzione dei fasci. Queste collisioni sono interessanti perché è durante questi eventi che il quark beauty viene prodotto con maggiore probabilità. Un

sofisticato rivelatore di vertice al silicio e un sistema che identifica le scie delle particelle nello spazio ci permetteranno di seguire da vicino i primi millesimi di miliardesimo di secondo di vita della particella, il mesone B, che contiene i quark beauty. Grandi specchi riflettenti chiariranno la natura delle particelle emesse nell'interazione primaria raccogliendo la luce Cherenkov su fotosensori al silicio.

A valle dell'esperimento, un grande muro di piombo e ferro permetterà di filtrare tutta la radiazione rimanente per identificare i muoni, veri e propri testimoni della reale natura dell'interazione avvenuta tra i protoni di Lhc.

Lhcb è una grande collaborazione internazionale che conta circa 600 tra fisici e ingegneri che hanno lavorato in questi anni al progetto. Italiani, tedeschi, spagnoli, inglesi, francesi, olandesi, svizzeri, russi, brasiliani, americani e ricercatori del Cern. L'Infn ha coperto un ruolo di grande rilevanza nella costruzione dell'apparato, in particolare per la parte dedicata all'identificazione dei mesoni K e dei muoni. L'apparato è in presa dati, assieme agli altri esperimenti di Lhc, dal novembre del 2009 e conta di raccogliere dati per almeno cinque anni. [Pierluigi Campana]

Biografia

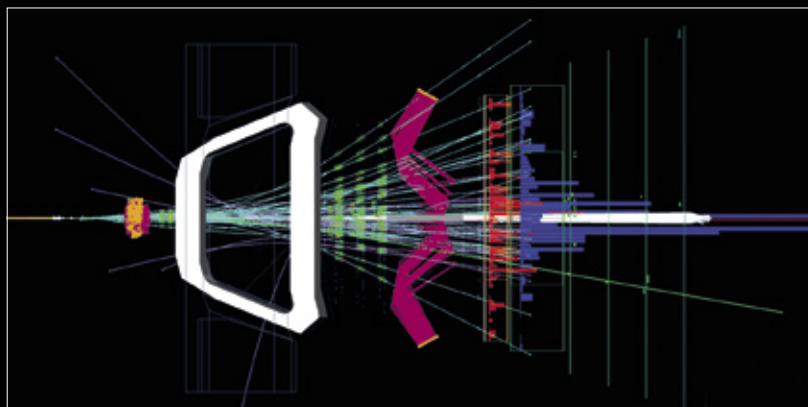
Pierluigi Campana è ricercatore ai Laboratori di Frascati dell'Infn, dove lavora dal 1993 all'esperimento Kloe a Dafne.

È stato recentemente nominato coordinatore internazionale dell'esperimento *Lhcb*, incarico che ricoprirà a partire da giugno 2011.

Link sul web

<http://lhcb.web.cern.ch/lhcb-public/>
<http://lhcb.web.cern.ch/lhcb/>
http://web.infn.it/lhcb_bologna/index.php/lhcb-virtual-tour

1.
2.



1.
Le prime collisioni all'energia di 7 TeV viste dall'esperimento *Lhcb*. La ricostruzione dell'evento registrato da *Lhcb* mostra l'asimmetria di questo esperimento che studia i cosiddetti "eventi in avanti", rispetto al punto di collisione dei fasci di protoni.

2.
Il rivelatore di vertice. Ha il compito di "fotografare" i decadimenti in volo (nello spazio di qualche millimetro) dei mesoni B e di determinare con la precisione di poche decine di micron il punto esatto dove il fenomeno è accaduto.

