

Avanti e indietro

La freccia microscopica del tempo

di Fabio Anulli



Mentre prendete un aperitivo e osservate un cubetto di ghiaccio che si sta sciogliendo nel vostro bicchiere di Spritz, non vi aspettereste mai che questo possa tornare a solidificarsi. Allo stesso modo, con il tempo inesorabilmente invecchiamo e possiamo scegliere cosa fare domani, ma non evitare gli errori commessi ieri. Per l'esperienza comune, dunque, il tempo è palesemente asimmetrico: la cosiddetta "freccia del tempo" scorre in una sola direzione e nessun processo macroscopico reale è reversibile nel tempo. Questa naturale evoluzione dei fenomeni nel tempo non è però legata a un'asimmetria delle leggi fisiche fondamentali, quanto piuttosto alla complessità dei sistemi e al concetto di entropia. Semplificando, possiamo dire che l'entropia è una misura del disordine di un sistema fisico. Sistemi isolati evolvono verso stati di entropia maggiore, cioè più disordinati, e questo processo risulta di fatto irreversibile.

A livello delle interazioni tra particelle elementari la situazione è però completamente diversa e ciò che ci sembra essere scontato, in realtà, non lo è affatto. L'urto tra due particelle, ad esempio, risulta perfettamente plausibile anche se "osservato"

a ritroso nel tempo, con le due particelle dello stato finale che si muovono in direzione opposta, urtano e ritornano nello stato iniziale, come se si trattasse di un film che viene visto al contrario. Ma nel corso degli anni, i fisici si resero conto che questo non è sempre vero e che anche nel mondo delle particelle esistono situazioni in cui i processi fisici non sono equivalenti se la direzione del tempo viene invertita. La conferma sperimentale definitiva è arrivata da uno studio, pubblicato dalla collaborazione Babar dello Slac National Accelerator Laboratory di Stanford (California) alla fine del 2012, in cui è stata annunciata la prima osservazione diretta di una violazione della simmetria per inversioni temporali, ossia di una irreversibilità delle leggi fisiche a livello microscopico. Vediamo di che si tratta e come è stato trovato questo risultato. In meccanica quantistica l'operazione di "inversione temporale" (indicata con T) corrisponde allo scambio dello stato iniziale con quello finale e all'inversione del segno del tempo. T è una delle cosiddette simmetrie *discrete*, insieme alla simmetria per inversioni spaziali P e a quella di carica C (ovvero la simmetria rispetto allo scambio di particelle con antiparticelle). Fino agli anni '50, si pensava che esse fossero rispettate dalle interazioni fondamentali, cioè che le interazioni fondamentali agissero nello stesso modo se applicate su un

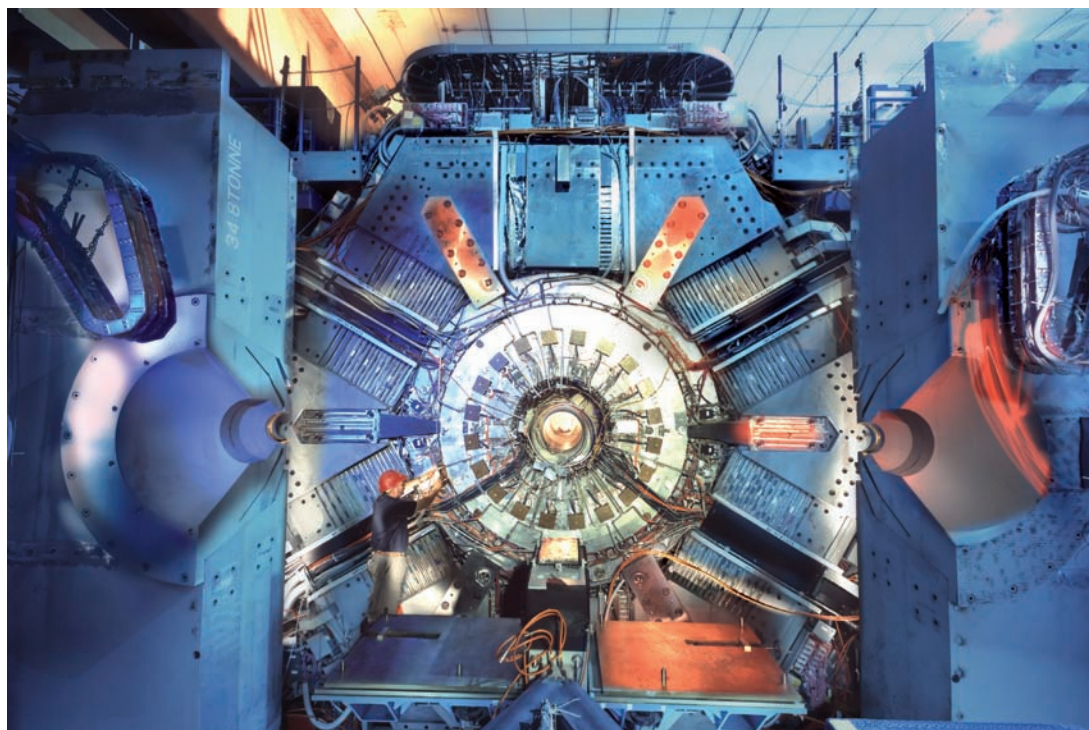
dato sistema o sulla sua versione speculare (la simmetria P) o, ancora, su quella che si ottiene scambiando tutte le particelle del sistema in antiparticelle (simmetria C). In seguito si scoprì che C, P e anche l'operazione combinata di C e P (il prodotto CP) sono in realtà violate dall'interazione debole (vd. Asimmetrie n. 16 p. 33, ndr).

Un teorema fondamentale della teoria dei campi asserisce che la simmetria ottenuta dall'operazione combinata CPT è rispettata da tutte le interazioni fondamentali. Per effetto del teorema CPT, se un certo processo fisico non conserva una delle simmetrie, allora deve violare anche il prodotto delle altre due e viceversa. Quindi, l'osservazione sperimentale che CP è violata implica che anche T debba essere violata dall'interazione debole. Per molti anni si è cercata la verifica sperimentale diretta della violazione di T. Ma questa, senza fare riferimento alla simmetria CP o CPT, è molto complicata da ottenere. Di fatto consiste nel confrontare la probabilità di un processo fisico con quella del processo ottenuto scambiando lo stato iniziale con quello finale e invertendo il segno delle grandezze fisiche dipendenti

dal tempo, come la velocità delle particelle coinvolte. Ciò risulta in genere sperimentalmente impossibile per la difficoltà di preparare lo stato iniziale del processo "invertito temporalmente". Un modo molto elegante per aggirare tali difficoltà fu proposto nel 1999 e realizzato sperimentalmente da Babar nel 2012. L'esperimento Babar è stato progettato per studiare gli effetti della violazione di CP nei decadimenti dei mesoni B, studiando i decadimenti di circa 500 milioni di coppie di mesoni B e anti-B (cioè contenenti, rispettivamente, un antiquark o un quark bottom), prodotti dalle collisioni tra elettroni e positroni all'acceleratore Pep-II, presso lo Slac National Accelerator Laboratory (vd. Asimmetrie n. 11 p. 35, ndr). La verifica della violazione di T si basa sulla misura della probabilità di trasformazione tra coppie di stati quantistici correlati dei mesoni B neutri. In particolare, si sono studiate le frequenze in funzione del tempo di due trasformazioni di mesoni B neutri, che si ottengono una dall'altra attraverso un'inversione temporale (vd. approfondimento a p. 28). È come se si osservasse una particella che si è trasformata in un'altra tornare indietro e

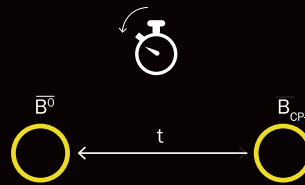
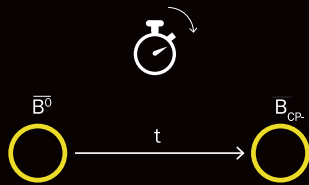
ri-trasformarsi nella particella originaria. Le frequenze misurate da Babar sono risultate diverse. Se la simmetria temporale fosse conservata, la probabilità che si verifici ciò sarebbe di una parte su 10^{43} , cioè incredibilmente piccola. Questo risultato rappresenta quindi la prima misura diretta della violazione di T. Inoltre il valore misurato di questa asimmetria è coerente con la violazione di CP osservata in analoghi decadimenti dei mesoni B neutri, così come richiesto dal teorema CPT. Prima di Babar, anche altri esperimenti avevano evidenziato asimmetrie riconducibili a una violazione di T. In genere, però, le misure effettuate facevano assunzioni riguardo al teorema CPT oppure riguardavano trasformazioni che implicavano anche la presenza di una violazione di CP, come nel caso dell'esperimento Cplear, che nel 1999 misurò la violazione di T con i mesoni K. La misura effettuata da Babar, invece, oltre a essere particolarmente bella, perché fa pieno uso di proprietà fondamentali della meccanica quantistica, non ha alcuna connessione con CP e CPT, e pertanto viene considerata la prima osservazione diretta della violazione di T.

a.
L'esperimento Babar allo Slac National Accelerator Laboratory a Stanford, negli Stati Uniti.

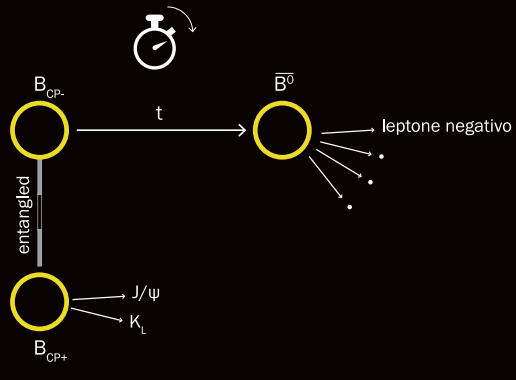
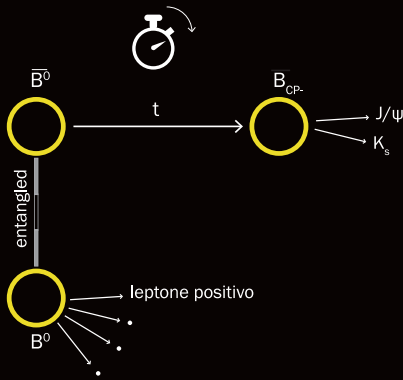


Specchio del tempo

riflessione temporale



misura di Babar



La verifica della violazione di T in Babar si basa sulla misura della probabilità di trasformazione tra coppie di stati quantistici correlati di particolari mesoni B neutri. Le coppie di mesoni B neutri prodotti in Babar possono essere di due tipi: la coppia di un B^0 e un anti- B^0 (stati che contengono rispettivamente un antiquark bottom e un quark bottom) e la coppia che indichiamo B_{CP+} - B_{CP-} (stati che si contraddistinguono per il comportamento sotto trasformazioni di CP). Nel tempo, questi stati evolvono gli uni negli altri, così per esempio dopo un certo tempo un anti- B^0 può trasformarsi in un B_{CP-} e un B_{CP-} in un anti- B^0 .

I diversi stati possono essere identificati analizzandone i prodotti di decadimento, che sono differenti nei vari casi possibili. Le coppie di mesoni neutri vengono create in uno stato di aggrovigliamento (in inglese *entanglement*, vd. *Asimmetrie* n. 16 p. 36, ndr), a causa del quale i due mesoni, pur allontanandosi l'uno dall'altro, rimangono intimamente connessi senza assumere un'identità ben definita: in altre parole, non si può dire chi sia la particella e chi l'antiparticella. Ma a causa dell'entanglement, quando il primo dei due mesoni decade, manifestando la propria identità attraverso i prodotti di decadimento (e si scopre così che si tratta per esempio di un B^0), si viene a conoscenza

1.

Per verificare la violazione di T in Babar, è stata studiata la trasformazione di un anti- B^0 in un B_{CP-} e quella inversa, di un B_{CP-} che si trasforma in un anti- B^0 (in alto). In basso sono visualizzate le catene di decadimento, grazie alle quali tale misura è stata realizzata.

dell'identità dell'altro mesone della coppia (che nel caso dell'esempio in fig. 1 sarà dunque un anti- B^0).

Tale proprietà diventa un formidabile strumento: si può selezionare lo stato iniziale del secondo mesone senza bisogno di doverlo misurare, scegliendo un particolare decadimento del primo mesone. Sfruttando l'entanglement è quindi possibile selezionare una catena di decadimento nella quale un anti- B^0 , identificato dal decadimento del B^0 entangled (in leptoni e altre particelle), si trasforma in un B_{CP-} , di cui si osserva direttamente il decadimento (il B_{CP-} decade nella particella J/Ψ e nel mesone K_S). Questa catena viene confrontata con la catena "inversa", in cui un B_{CP-} , identificato dal decadimento del B_{CP+} entangled (il B_{CP+} decade nella particella J/Ψ e nel mesone K_L), si trasforma in un anti- B^0 , di cui si osserva direttamente il decadimento (vd. fig. 1, in basso). Questo procedimento ha permesso di confrontare l'evoluzione temporale di una trasformazione con la sua inversione temporale, ossia la sua riflessione attraverso lo specchio del tempo. Confrontando, in funzione del tempo, le probabilità con cui si verificano le due trasformazioni, si è scoperto che queste probabilità risultano diverse, dimostrando così in maniera diretta la violazione della simmetria temporale T.

Biografia

Fabio Anulli è ricercatore dell'Infn presso la sezione di Roma. La sua attività di ricerca si svolge nel campo della fisica sperimentale delle alte energie. Ha collaborato a diversi esperimenti ad acceleratori di particelle, in particolare a Kloe presso i Laboratori Nazionali di Frascati, Babar presso lo Slac National Accelerator Laboratory a Stanford, nel quale attualmente ricopre la carica di Physics Analysis Coordinator, e l'esperimento Atlas al Cern di Ginevra.

Link sul web

<http://www-public.slac.stanford.edu/babar/>

<https://www6.slac.stanford.edu/news/2012-11-19-babar-trv.aspx>

<http://physics.aps.org/articles/v5/129>

<http://blogs.nature.com/news/2012/11/particle-physicists-confirm-arrow-of-time-for-b-mesons.html>

<http://physicsworld.com/cws/article/news/2012/nov/21/babar-makes-first-direct-measurement-of-time-reversal-violation>