

Tempi moderni

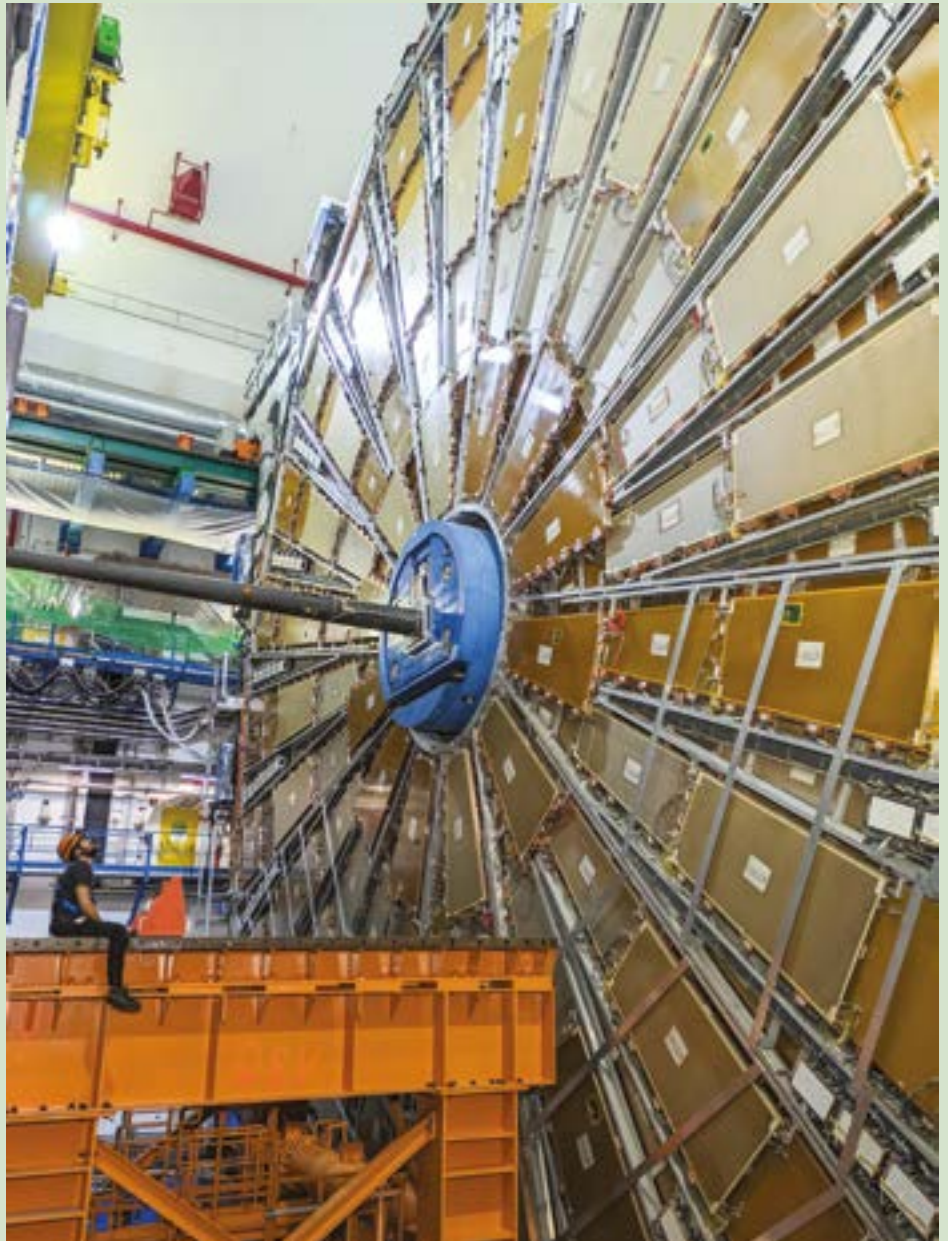
Pico- e nanosecondi negli esperimenti di fisica delle particelle

di Martina Malberti

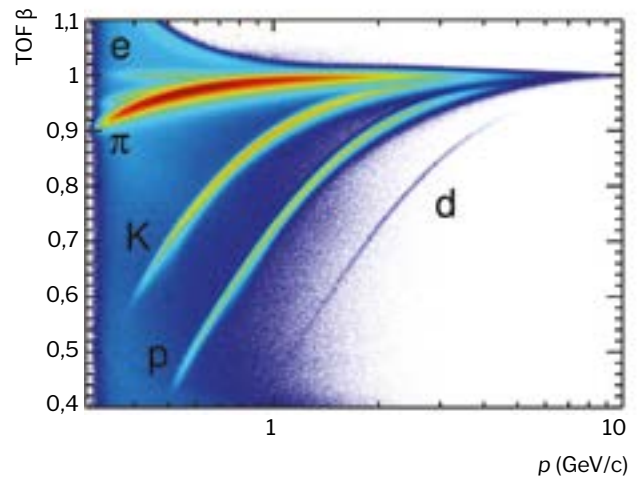
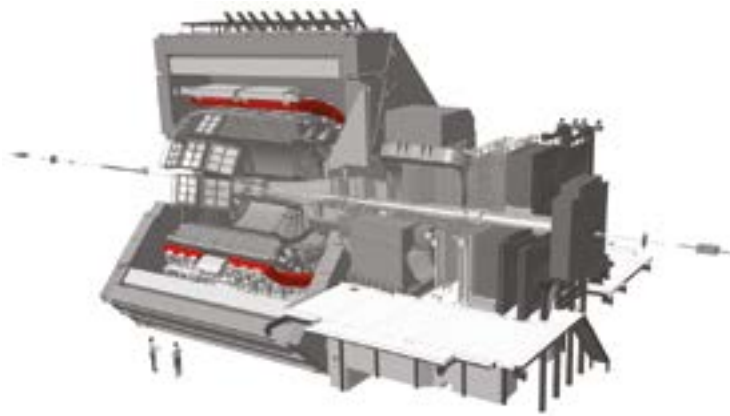
Negli esperimenti agli acceleratori, il tempo viene misurato in unità ben più piccole e quasi inconcepibili per la nostra esperienza, in nanosecondi (miliardesimi di secondo) o persino in picosecondi (millesimi di miliardesimi di secondo). Si pensi che un battito di ciglia ha una durata tra 0,1 e 0,4 secondi, mentre un nanosecondo è 100 milioni di volte più breve e un picosecondo 100 miliardi di volte più breve.

Ma a cosa serve misurare intervalli di tempo così piccoli? Negli acceleratori, come LHC, le particelle viaggiano a velocità prossime a quella della luce e le loro collisioni producono fenomeni che durano tempi estremamente ridotti. Per dare un'idea, il tempo necessario per percorrere la distanza di 1 m (una scala di grandezza confrontabile con le dimensioni dei rivelatori) viaggiando alla velocità della luce è circa 3,3 ns. Se vogliamo misurare intervalli di quest'ordine di grandezza dobbiamo disporre di strumenti più precisi del nanosecondo.

Una delle più comuni applicazioni di misure di tempo precise in esperimenti di fisica delle particelle è la loro identificazione tramite la misura del "tempo di volo" (*time-of-flight*, TOF). Questa tecnica è basata sulla misura del tempo che la particella impiega a percorrere una determinata distanza tra due punti, ad esempio tra il punto di interazione (dove è avvenuta la collisione) e il rivelatore. Conoscendo la lunghezza del cammino e il tempo impiegato, è possibile ricavare la velocità della particella. Combinando questa informazione con la misura del momento ottenuta da altri sottorivelatori come i tracciatori, si può determinare la sua massa e quindi la sua identità.



a. Particolare del rivelatore ATLAS, uno dei grandi esperimenti al Large Hadron Collider del Cern di Ginevra.



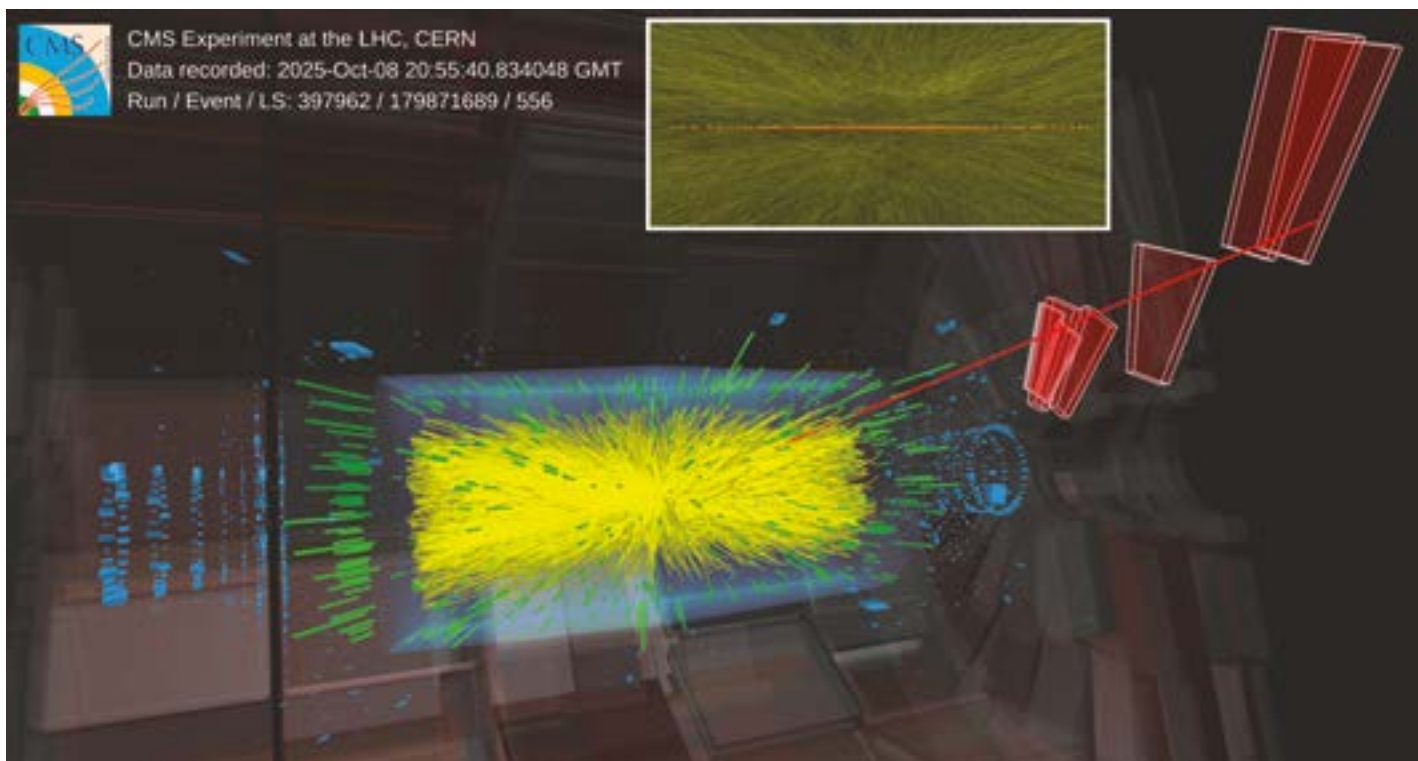
Ad esempio, un pione (di massa ca. $140 \text{ MeV}/c^2$) con un momento di $1 \text{ GeV}/c$ impiega $3,37 \text{ ns}$ a percorrere 1 m , un kaone (di massa ca. $496 \text{ MeV}/c^2$) dello stesso momento impiega $3,72 \text{ ns}$, un protone (di massa ca. $938 \text{ MeV}/c^2$) invece $4,57 \text{ ns}$.

Le differenze dei tempi di volo sono alcune centinaia di picosecondi: con uno strumento di misura con precisione dell'ordine dei 100 picosecondi saremo in grado di distinguere tra le specie. Uno degli esempi più avanzati di rivelatori di tempo di volo attualmente in uso in un esperimento a collisori è il sistema TOF dell'esperimento ALICE al CERN (vd. fig. b), che utilizza una particolare tecnologia di rivelatori a gas chiamata Multigap Resistive Plate Chambers (MRPC), appositamente sviluppata per ottenere risoluzioni temporali molto elevate in grandi aree (ca. 60 ps per una superficie di circa 150 m^2). Il TOF di ALICE permette di identificare particelle fino a momenti di alcuni GeV/c , fondamentale per studiare il plasma di quark e gluoni prodotto nelle collisioni di ioni pesanti.

Ma l'identificazione di particelle non è l'unica applicazione. Negli ultimi anni, la spinta verso futuri collisori ad alta luminosità, come l'High-Luminosity LHC (HL-LHC), ha portato a una rinnovata attenzione verso sistemi capaci di misure di tempi con estrema precisione. Ad ogni scontro dei fasci di protoni, infatti, non si ha una sola collisione, ma se ne producono molte, addirittura centinaia al HL-LHC, e

quasi simultanee. Questo fenomeno è detto "*pileup*". La densità di interazioni degli eventi perché le tracce e depositi energetici prodotti nelle collisioni risultano sovrapposti (vd. fig. c). Se vogliamo studiare con precisione un singolo evento raro, dobbiamo quindi riuscire a separarlo dalla confusione degli altri. Come entra in gioco una misura molto precisa del tempo di arrivo di ciascuna particella per aiutarci a capire da quale collisione ha avuto origine? Le collisioni in realtà non avvengono tutte esattamente nella stessa posizione e stesso istante, ma si distribuiscono per alcuni centimetri lungo la direzione dei fasci e su un intervallo di ca. 200 picosecondi nel tempo. Ecco che allora se il tempo di arrivo di ogni particella prodotta nelle collisioni viene misurato con una precisione di qualche decina di picosecondi, è possibile associarla al corretto vertice di interazione e a eventi che nello spazio sembrano coincidenti e si rivelano dunque separati nel tempo. Una misura precisa di tempo non serve solo a "fare ordine" tra collisioni caotiche, ma può anche diventare strumento per la ricerca di fenomeni di nuova fisica. Alcuni modelli teorici oltre il modello standard prevedono infatti la produzione di nuove particelle a lunga vita media (nanosecondi, microsecondi o più), che decadono a distanze macroscopiche dal punto di collisione. Rivelatori di tempo molto precisi aiutano a distinguere un segnale "in ritardo" da quello prodotto da particelle ordinarie.

b.
Il rivelatore TOF (in rosso) dell'esperimento ALICE. A destra, il grafico rappresenta la velocità $\beta=v/c$, misurata tramite la tecnica del tempo di volo, in funzione del momento p per diverse specie di particelle.



Al CERN entrambi i grandi esperimenti ATLAS e CMS stanno installando per la fase di HL-LHC dei nuovi sottorivelatori dedicati alla misura precisa del tempo di arrivo di particelle cariche. Le tecnologie di sensori adottate sono diverse, ma tutte hanno l'obiettivo di fornire misure di tempo con precisioni di 30-40 picosecondi: nella parte più centrale del MIP Timing Detector dell'esperimento CMS si utilizzeranno cristalli scintillanti di ossiortosilicato di lutezio e ittrio (LYSO) accoppiati a fotomoltiplicatori al silicio; le regioni vicine ai fasci di protoni, che sono quelle più soggette alle radiazioni, saranno invece equipaggiate con sensori al silicio veloci, che offrono la possibilità di moltiplicare il segnale, i cosiddetti Low Gain Avalanche Diodes. Non bastano però solo sensori veloci e precisi: servono anche una catena elettronica di lettura straordinariamente rapida e una sincronizzazione impeccabile. A tale scopo, gli esperimenti usano

un riferimento temporale chiamato *clock*, un segnale regolare comune senza il quale sarebbe impossibile correlare segnali provenienti dalle diverse componenti dei rivelatori e quindi attribuirli o meno allo stesso evento fisico. Il *clock* di LHC ha una frequenza di 40 MHz, corrispondente a 25 nanosecondi. È fondamentale che il segnale del *clock* sia stabile e preciso, ovvero che eventuali piccole fluttuazioni o distorsioni (il cosiddetto "jitter", vd. p. 30) siano ridotte al minimo. Tecnologie avanzate, come il White Rabbit Project, hanno reso possibile distribuire segnali di *clock* agli esperimenti con la precisione di picosecondi. Misurare tempi con precisione estrema in fisica delle particelle è dunque una sfida tecnologica straordinaria che apre nuove opportunità per approfondire la comprensione delle interazioni fondamentali della natura.

c. Un evento osservato nel rivelatore CMS durante un test ad alto numero di eventi concomitanti (*pileup*) effettuato l'8 ottobre 2025. L'insero mostra una vista ingrandita dei 206 vertici di interazione ricostruiti (punti arancioni) e più di 9000 tracce ricostruite (linee gialle).

Biografia

Martina Malberti è ricercatrice dell'INFN presso la sezione di Milano Bicocca. Dal 2004 partecipa all'esperimento Compact Muon Solenoid (CMS) al CERN. Negli ultimi anni si è occupata dello sviluppo del MIP Timing Detector per l'*upgrade* di CMS.