

RICERCA DI MESONI PSEUDOSCALARI IN INTERAZIONI $\gamma\gamma$ CON L'ESPERIMENTO KLOE

di Cecilia Taccini

Il lavoro di tesi descritto in questo articolo è stato sviluppato nell'ambito dell'esperimento KLOE alla Φ -factory DAΦNE presso i Laboratori Nazionali di Frascati dell'INFN. Vengono presentati i risultati dello studio della produzione di risonanze mesoniche pseudoscalari in interazioni fotone-fotone con fasci di elettroni e positroni. I dati analizzati sono stati raccolti da KLOE nel 2006 a un'energia del centro di massa di 1 GeV.

Parole chiave: fisica $\gamma\gamma$, collisioni e^+e^- , mesone η , larghezza di decadimento

Keywords: $\gamma\gamma$ physics, e^+e^- collisions, η meson, decay width.

I MATTONCINI FONDAMENTALI DELLA MATERIA

Fin dall'antichità l'uomo cerca di classificare la materia in termini di elementi *fondamentali*, ossia semplici, indivisibili, privi di struttura interna. Il filosofo greco Aristotele sosteneva che la materia fosse infinitamente divisibile e che la Terra fosse composta da quattro elementi: aria, acqua, terra e fuoco. La più moderna teoria atomica di Democrito prevedeva che l'atomo – dal greco *àtomos*, *indivisibile* – fosse l'elemento fondamentale dell'universo. La teoria atomica fu rivalutata solo all'inizio del XIX secolo, quando alcune scoperte nel campo della chimica mostrarono che la materia si comporta effettivamente come se fosse formata da particelle. L'atomo è stato considerato l'unità elementare della materia fino alla fine del XIX secolo quando, grazie alla scoperta dell'elettrone prima e di protone e neutrone in seguito, è stato possibile individuarne la struttura interna. L'elettrone è oggi considerato una particella elementare. Protoni e neutroni sono invece oggetti composti da particelle più piccole chiamate quark. Intorno agli anni '60 i fisici hanno scoperto una grande quantità di particelle e successivamente hanno sviluppato una teoria, chiamata *Modello Standard*, che descrive tutte le centinaia di particelle presenti in natura e le lo-

ro interazioni - esclusa la gravità - in termini di pochi elementi fondamentali: dodici particelle che costituiscono la materia e quattro particelle mediatrici di forza. Le particelle di materia sono i quark e i leptoni. Nella famiglia dei leptoni si trova l'elettrone. Le particelle di materia interagiscono tra loro scambiandosi particelle mediatrici di forza, come ad esempio il fotone, che regola le interazioni tra particelle elettricamente cariche (interazioni elettromagnetiche).

I quark si raggruppano per formare oggetti composti chiamati adroni. Gli adroni si dividono in barioni, formati da tre quark e mesoni, formati da due quark. Il protone è un esempio di barione. Ad ogni particella di materia è inoltre associata un'*antiparticella* che ha le stesse proprietà ma carica elettrica opposta. Una presentazione più completa delle particelle e delle forze fondamentali si può trovare in ref. 1.

Il lavoro di tesi presentato in questo articolo è basato sullo studio della produzione di un particolare tipo di adroni – *i mesoni pseudoscalari* – attraverso interazioni tra due fotoni. I mesoni pseudoscalari sono caratterizzati da *spin* uguale a zero e *parità* negativa. Lo spin, anche chiamato momento angolare intrinseco, è una proprietà quantistica delle particelle legata al comportamento in presenza di campo magnetico. La parità invece descrive il comportamento di un sistema quando vengono invertite le

coordinate spaziali. La parità intrinseca di una particella, che può assumere valori +1 (parità positiva) o -1 (parità negativa), rappresenta il contributo della particella alla parità totale del sistema.

COME STUDIARE IL MONDO SUBATOMICO

Per esplorare la struttura della materia e studiare il comportamento delle particelle subatomiche è necessario utilizzare una sorta di potenti microscopi chiamati *acceleratori di particelle*. L'uomo osserva il mondo grazie alle informazioni portate dalle onde della luce, formate da un numero grandissimo di fotoni, che vengono emesse o riflesse dagli oggetti. La luce visibile, cioè quella che l'occhio umano riesce a recepire, ha una lunghezza d'onda di circa 500 nanometri. Non è possibile vedere oggetti di dimensioni inferiori. Per esplorare le strutture microscopiche della materia è necessario avere a disposizione delle sonde con lunghezza d'onda molto minore. La meccanica quantistica prevede che tutte le particelle elementari abbiano una "doppia personalità": si comportano sia come corpuscoli sia come onde con lunghezza d'onda inversamente proporzionale alla loro energia. E' quindi necessario aumentare l'energia delle particelle per ottenere delle sonde con lunghezza d'onda adeguatamente piccola. Questo viene fatto dagli acceleratori, che forniscono energia alle particelle accelerandole con grandi campi elettrici. E' possibile inoltre, sfruttando l'equivalenza tra massa ed energia ($E=mc^2$), far collidere le particelle accelerate per generare, nell'urto, nuove particelle. In altri termini, l'energia delle particelle iniziali viene trasformata in energia/massa di nuove particelle. E' in questo modo che i fisici riescono a creare in laboratorio particelle *instabili* in natura (cioè che hanno vita molto breve) e studiarne le caratteristiche. Gli acceleratori in cui vengono fatti scontrare due fasci di particelle di alta

energia che circolano in versi opposti si chiamano acceleratori *a fasci collidenti*, o più comunemente *collisori*.

DAΦNE e KLOE

Un esempio di collisore è DAΦNE (vedi ref.2) , *Double Annularφ Factory for Nice Experiments*, situato ai Laboratori Nazionali di Frascati dell'INFN. DAΦNE è composto, come suggerisce il nome, da due anelli di collisione, lunghi circa 100 metri. In un anello vengono accelerati gli elettroni, nell'altro le loro antiparticelle, i positroni. Campi magnetici vengono utilizzati per focalizzare i fasci di particelle e per curvare la loro traiettoria. Elettroni e positroni compiono più di 3 milioni di giri in un secondo e sono accelerati fino a raggiungere un'energia di 0,51 miliardi di elettronvolt (gigaelettronvolt, GeV) per fascio ($1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$). Queste energie sono piccole se confrontate con oggetti macroscopici: basti pensare che un'ape in volo ha un'energia di circa 10^{15} eV . L'energia complessiva che si raggiunge a DAΦNE è 1.02 GeV (*), poco più dell'energia necessaria per creare un protone e corrisponde alla massa del mesone ϕ . Per questo motivo DAΦNE è chiamata *φ-factory*.

Le collisioni tra le particelle accelerate, anche chiamate *eventi*, sono registrate da una sorta di grandi macchine fotografiche digitali: i rivelatori. Molto spesso le particelle prodotte nell'evento tendono a trasformarsi - decadere - immediatamente in altre particelle, senza lasciare segni visibili nel rivelatore. E' compito del fisico dedurre l'esistenza di queste particelle instabili a partire dalle sole informazioni che si possono trarre dalle particelle finali - i prodotti di decadimento - registrate dal rivelatore. I rivelatori vengono utilizzati per identificare le particelle, ricostruirne la traiettoria, effettuare misure di quantità di moto e di energia e hanno tipicamente una struttura a strati che si sviluppa intorno al punto di interazione dei fasci. Ogni strato è sensibile ad un diverso aspetto di

un evento, ad un particolare tipo di proprietà delle particelle. Il rivelatore che registra le collisioni che avvengono a DAFNE si chiama (vedi ref. 2), *K Long Experiment*, e ha questo nome perché era stato inizialmente progettato per studiare i mesoni *K Long*, così chiamati perché hanno un tempo di vita relativamente lungo: percorrono circa 3.4 m prima di decadere. KLOE è composto da due strati, una camera a deriva e un calorimetro elettromagnetico, ed è immerso in un campo magnetico di 0.5 Tesla, circa 10.000 volte più intenso del campo magnetico sulla superficie terrestre. La camera a deriva è un cilindro con un diametro di 4 m e lunghezza di ~3.5 m ed è utilizzata per rivelare il passaggio di particelle cariche. E' costituita da 12.500 fili con potenziale elettrico positivo tenuti tesi da due piatti posti alle estremità del cilindro, ed è riempita con una miscela di elio e isobutano. Le particelle cariche, quando attraversano il gas, rimuovono gli elettroni dagli atomi producendo coppie di ioni positivi ed elettroni. Questo fenomeno è noto come ionizzazione. Il campo elettrico presente nella camera fa poi migrare gli elettroni prodotti nella ionizzazione verso i fili sensibili e il *tempo di deriva* degli elettroni - il tempo che gli elettroni impiegano per arrivare ai fili - viene utilizzato per ottenere informazioni sulla traccia della particella incidente. La camera a deriva permette inoltre di fare misure di quantità di moto, sfruttando il fatto che la traiettoria delle particelle cariche viene curvata in presenza di un campo magnetico. Il raggio di curvatura è inversamente proporzionale alla quantità di moto. Inoltre, particelle con carica opposta vengono curvate in direzioni opposte.

Il calorimetro è uno strato di materiale spesso circa 23 cm che circonda la camera a deriva. E' diviso in moduli costituiti da fogli di piombo e fibre scintillanti ed è utilizzato per fare misure di energia e di posizione. Sia le particelle cariche sia quelle neutre interagiscono nelle fibre producendo luce, che viene raccolta e convertita in segnali elettrici. L'ampiezza dei segnali è

proporzionale all'energia della particella. La differenza dei tempi di arrivo dei segnali alle due estremità dei moduli permette di ricostruire il punto di ingresso della particella nel calorimetro.

(*) In realtà i dati utilizzati per questa analisi sono stati presi a un'energia poco più bassa, 1 GeV.

PRODUZIONE DI MESONI IN INTERAZIONI FOTONE-FOTONE

Il processo studiato nel lavoro di tesi qui presentato è la produzione del mesone η in interazioni tra due fotoni. Il mesone η appartiene alla classe dei mesoni pseudoscalari. Dal punto di vista interpretativo, la collisione di fasci di fotoni di alta energia risulta complicata. Un modo per superare tale difficoltà consiste nell'utilizzare acceleratori di elettroni e positroni, sfruttando il fatto che particelle cariche accelerate emettono radiazione. Ciascuno dei due leptoni (elettrone, positrone) irradia un fotone di bassa energia e con angolo piccolo rispetto alla direzione dei fasci incidenti. I due fotoni interagiscono producendo particelle come mesoni π (pioni) o mesoni η , mentre i leptoni procedono il loro cammino quasi indisturbati, deviando molto poco dalla traiettoria iniziale. Studiare le interazioni tra fotoni permette di ottenere informazioni sulle proprietà delle particelle nuove prodotte. A DAFNE è possibile produrre il mesone η in interazioni tra due fotoni. Il passaggio dallo stato iniziale a quello finale viene indicato come $e^+e^- \rightarrow e^+e^- \gamma\gamma \rightarrow e^+e^- \eta$, o più brevemente $e^+e^- \rightarrow e^+e^- \eta$. Nel rivelatore (KLOE) si osservano le particelle presenti nello stato finale del processo. Gli elettroni e i positroni non vengono rivelati, perché sono emessi ad angoli troppo piccoli e finiscono in una zona scoperta del rivelatore. Il mesone η è instabile e decade immediatamente in due pioni carichi e un pione neutro: $\eta \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$. Anche

il pione neutro è instabile e decade in due fotoni: $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$. Riassumendo, il processo completo si può scrivere come: $e^+e^- \rightarrow e^+e^- \gamma\gamma \rightarrow e^+e^- \eta \rightarrow e^+e^- \pi^+\pi^-\pi^0 \rightarrow e^+e^- \pi^+\pi^-\gamma\gamma$. Le particelle finali registrate in KLOE sono un pione con carica positiva, un pione con carica negativa e due fotoni. I pioni vengono associati a due tracce con curvatura opposta nella camera a deriva, mentre i fotoni danno un segnale nel calorimetro.

ANALISI DEI DATI

Analizzare i dati significa sviluppare delle procedure che permettano di distinguere gli eventi interessanti - *eventi di segnale* - da quelli non interessanti. Lo stesso stato finale può infatti essere prodotto da eventi di diverso tipo o, detto in altri termini, diversi processi possono simulare il segnale cercato. Nel caso della produzione di η in interazioni $\gamma\gamma$, ad esempio, quando η decade in $\pi^+\pi^-\pi^0$ lo stato finale è formato da due fotoni e due pioni carichi (gli elettroni e i positroni non sono rivelati). Ma anche il processo $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ dà origine allo stesso stato finale, così come il processo $e^+e^- \rightarrow \omega\gamma$ con $\omega \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ quando uno dei fotoni sfugge alla rivelazione. Questi eventi sono chiamati *eventi di fondo*. Bisogna poi considerare che alle energie a cui lavora DAΦNE la probabilità che avvenga il processo $e^+e^- \rightarrow e^+e^-\eta$ è molto più piccola rispetto alla probabilità dei processi di fondo. Infine, la risoluzione del rivelatore non è infinita: gli oggetti non sono mai perfettamente *a fuoco*. In altri termini, energia e impulso delle particelle sono conosciuti con una precisione limitata.

Le caratteristiche del segnale e dei fondi vengono studiate utilizzando tecniche di simulazione. La simulazione riproduce al computer il processo fisico specifico, l'interazione delle particelle con la materia, la geometria e l'efficienza del rivelatore. In pratica permette di ottenere, per ogni processo, informazioni relative a energia, quantità di moto, direzione delle

particelle così come vengono "viste" dal rivelatore. Questo è molto importante sia per fare studi di fattibilità, come ad esempio capire se è possibile distinguerle segnale e fondo, sia per confrontare quello che succede nella realtà (i dati) con quello che ci si aspetta dalla teoria (la simulazione).

La selezione degli eventi interessanti viene fatta utilizzando variabili *discriminanti*. Una delle variabili utilizzate è la differenza tra la massa del sistema dei due fotoni e la massa del π^0 relativamente alla risoluzione del rivelatore. Nel processo cercato, infatti, i due fotoni provengono dal decadimento di un π^0 . Deve essere quindi possibile ricostruire, con una precisione limitata dalla risoluzione del rivelatore, la massa del π^0 - che è nota - a partire dalle informazioni - energia, coordinate spaziali - dei due fotoni. Questo non è necessariamente vero per i processi di fondo. In modo del tutto analogo si ricostruisce la massa del sistema $\pi\pi\gamma\gamma$ e si confronta il risultato ottenuto con la massa del mesone η . Una caratteristica specifica del segnale è inoltre la presenza di *energia mancante e massa mancante*, dovuta al fatto che elettroni e positroni presenti nello stato finale non vengono rivelati. Per la legge di conservazione dell'energia, infatti, tutta l'energia disponibile nello stato iniziale (i.e. l'energia dei fasci di elettroni e positroni) deve essere utilizzata per la creazione delle particelle nello stato finale. Se alcune particelle sfuggono alla rivelazione, la somma delle energie delle particelle rivelate sarà minore dell'energia di partenza. Si parla allora di energia mancante. Se le particelle perse hanno massa diversa da zero si parla anche di massa mancante. La massa mancante, in particolare, è una variabile molto utile per la trattazione del fondo $e^+e^- \rightarrow \eta\gamma$, che simula il segnale quando il fotone sfugge alla rivelazione. In questo caso, infatti, l'evento ha massa mancante uguale a zero perché il fotone perso ha massa nulla (vedi Fig. 1).

Dopo aver selezionato in modo più efficiente possibile gli eventi interessanti si sceglie una

variabile, in questo caso la massa mancante al quadrato, su cui effettuare un *fit*. La procedura di *fit* consiste nel trovare una stima del numero di eventi di segnale e di fondo tale che si raggiunga il miglior accordo tra dati e simulazione. Dopo aver estratto il numero di eventi interessanti presenti nei dati, è possibile calcolare la probabilità che il processo avvenga, quantificata da un parametro chiamato *sezione d'urto*.

RISULTATI

Per il processo $e^+e^- \rightarrow e^+e^- \eta \rightarrow e^+e^- \pi^+\pi^-\pi^0$ si ottengono alla fine della selezione circa 600 eventi di segnale, che corrispondono alla sezione d'urto: $\sigma(e^+e^- \rightarrow e^+e^- \eta) = (49 \pm 2_{\text{stat}} \pm 7_{\text{sist}})$ picobarn ($1\text{barn}=10^{-24} \text{ cm}^2$). In questa misura sono presenti l'errore statistico, legato al numero di eventi, e l'errore sistematico, legato al metodo utilizzato per fare la misura.

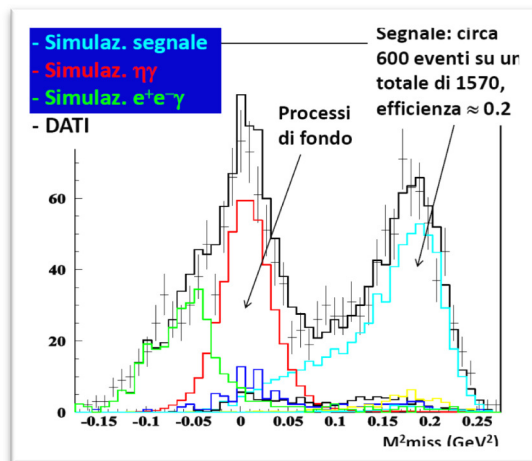


Figura 1

Distribuzione della massa mancante al quadrato, M^2_{miss} , per il sistema $\pi\pi\gamma\gamma$ alla fine dei tagli di selezione. Le distribuzioni con linea continua rappresentano le simulazioni: il segnale (in azzurro), i processi di fondo principali (in rosso e in verde, $e^+e^- \rightarrow \eta\gamma$ ed $e^+e^- \rightarrow e^+e^- \gamma$, rispettivamente), la somma di segnale e fondi (in nero). I dati sono rappresentati dalle croci. Si può vedere chiaramente la differenza tra il se-

gnale, che ha valori alti di M^2_{miss} , e i fondi, che hanno $M^2_{\text{miss}} < 0.1$.

RISULTATI, TRE ANNI DOPO

Il risultato ottenuto in questo lavoro di tesi è stato poi affinato nei tre anni successivi, durante il dottorato di ricerca. La selezione degli eventi di segnale è stata ottimizzata e il fit è stato fatto su due variabili per sfruttare, oltre alla massa mancante al quadrato, anche le informazioni relative alla componente trasversa (perpendicolare alla direzione di incrocio dei fasci) della quantità di moto delle particelle nello stato finale. Sono state inoltre misurate le sezioni d'urto del processo di segnale $e^+e^- \rightarrow e^+e^- \eta$ con $\eta \rightarrow 3\pi^0$ e del fondo principale $e^+e^- \rightarrow \eta\gamma$. Infine è stato possibile utilizzare le informazioni ottenute sulla produzione di η tramite due fotoni – o, detto in altri termini, sull'accoppiamento di η ai due fotoni – per determinare la larghezza parziale $\Gamma(\eta \rightarrow \gamma\gamma)$. La larghezza parziale è un parametro legato al tempo medio che deve trascorrere prima che la particella decada – i.e. la sua vita media – e al tasso percentuale di decadimento in un determinato stato finale. In formule, la larghezza di η in $\gamma\gamma$ si scrive come $\Gamma(\eta \rightarrow \gamma\gamma) = \text{\%}(\eta \rightarrow \gamma\gamma)/\tau$. Il risultato ottenuto (vedi Fig. 2) è in accordo con la media mondiale riportata dal *Particle Data Group* (vedi ref.3) e rappresenta la misura più precisa esistente oggi in letteratura.

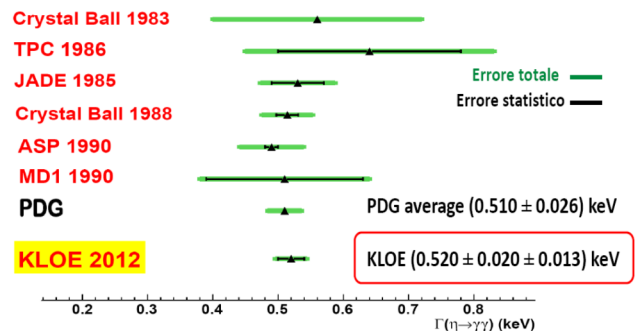


Figura 2

Risultati sperimentali per la misura della larghezza parziale $\Gamma(\eta \rightarrow \gamma\gamma)$. La linea nera rap-

presenta l'errore statistico, quella verde l'errore totale (statistico più sistematico). Gli ultimi due valori rappresentano la media riportata dal Particle Data Group e la misura di KLOE.

CONCLUSIONI

Questo lavoro di tesi si inquadra nel contesto della fisica adronica a basse energie. Con il rivelatore KLOE e i fasci di elettroni e positroni accelerati da DAΦNE è stato possibile osservare la produzione del mesone η in interazioni fotone-fotone. L'analisi del processo $e^+e^- \rightarrow e^+e^- \eta$ con $\eta \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ ha permesso di fare una misura di precisione della sezione d'urto $\sigma(e^+e^- \rightarrow e^+e^- \eta)$ e ha portato, successivamente, alla migliore misura esistente in letteratura della larghezza parziale $\Gamma(\eta \rightarrow \gamma\gamma)$. Questi risultati sono di grande interesse per la comprensione di alcune proprietà dei mesoni pseudoscalari e danno un contributo importante allo sviluppo

di modelli teorici che descrivono le interazioni tra particelle composte da quark.

L'articolo dal titolo "Measurement of η meson production in $\gamma\gamma$ interactions and $\Gamma(\eta \rightarrow \gamma\gamma)$ with the KLOE detector" (vedi ref.4) è stato pubblicato dalla rivista JHEP (*Journal of High Energy Physics*) ed è disponibile all'indirizzo <http://arxiv.org/abs/1211.1845>.

RINGRAZIAMENTI

Desidero ringraziare i miei relatori, il Prof. F. Ceradini e il Dott. F. Nguyen, la Collaborazione KLOE/KLOE-2, l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare e l'Università degli Studi Roma Tre. Un ringraziamento speciale va a F. Piccinini e A. Polosa per il supporto con il codice di simulazione per la generazione di eventi di segnale. Ringrazio infine l'Associazione Nazionale Professionale per la Ricerca (ANPRI) per avermi assegnato il premio "VINCENZA CELLUPRICA", edizione 2012.

Riferimenti bibliografici

1. http://www.infn.it/multimedia/particle/paitaliano/adventure_home.html (versione italiana di www.particleadventure.org)
2. P. Franzini, DAFNE E KLOE, ANALYSIS N.2-3/2008.
3. J. Beringer et al. (Particle Data Group), Phys. Rev. D86, 010001 (2012), The Review of Particle Physics
4. D. Babusci et al., Measurement of η meson production in $\gamma\gamma$ interactions and $\Gamma(\eta \rightarrow \gamma\gamma)$ with the KLOE detector, JHEP01 (2013) 119 (<http://arxiv.org/abs/1211.1845>).

CECILIA TACCINI

Cecilia Taccini è assegnista di ricerca dell'INFN presso la Sezione di Roma Tre. Durante il periodo di tesi per il conseguimento della laurea Magistrale in Fisica e successivamente, durante il Dottorato di Ricerca, si è occupata di fisica gamma-gamma a KLOE. Attualmente svolge attività di ricerca nell'ambito della fisica delle particelle elementari collaborando con l'esperimento ATLAS al CERN di Ginevra.

Contatti:

INFN Sez. Roma Tre

Via della Vasca Navale, 84

00143 Roma

