

DAΦNE E KLOE

di Paolo Franzini

Presentiamo una semplice, rapida guida di KLOE, il principale esperimento al collisore DAΦNE dell'INFN, costruito a Frascati. I principi di DAΦNE e KLOE e l'impatto dei risultati di KLOE sulla fisica delle particelle elementari e le sue simmetrie sono descritti in modo comprensibile ai non esperti.

I Laboratori Nazionali di Frascati, 1959

Nella primavera del 1959, stava entrando in funzione ai Laboratori Nazionali di Frascati (LNF) dell'INFN, l'elettrosincrotrone da un GeV. Coi miei giovani colleghi I. Mannelli, V. Silvestrini e R. Santangelo ci preparavamo a ricevere uno dei primi fasci prodotti dalla nuova macchina. L'esperimento fu concluso dopo la mia partenza per un anno di ricerca negli Stati Uniti, presso la Columbia University. Anno che terminò nel 1991 quando tornai in Italia, con mia moglie Juliet Lee-Franzini, per guidare una nuova impresa a Frascati. La mia tesi di laurea a Pisa, 1954-55, sullo studio della diffusione di elettroni su nuclei, era ispirata dalla possibilità di poter fare tali esperimenti alla nuova macchina italiana, allora nelle sue fasi iniziali di progetto a Pisa. Come studente avevo seguito il corso di fisica superiore di Giorgio Salvini. I miei primi anni di ricerca a Pisa furono sotto la guida di Marcello Conversi, uno dei grandi fisici italiani attivi allora in Italia che aveva pochi anni prima dimostrato che il "mesotrone" della radiazione cosmica non era la particella di Yukawa ma qualcosa di totalmente nuovo che oggi riconosciamo come la seconda particella elementare, dopo l'elettrone di Thomson, scoperta dalla fisica. Lavoravo allora sullo studio del decadimento dell'iperone Λ^0 , che portò il gruppo Bologna-Columbia-Pisa alla prima osservazione della violazione della parità in assenza di neutrini. Ero anche molto interessato nel progetto in corso a Pisa per quello che divenne il sincrotrone di Frascati, il primo moderno acceleratore italiano. Conoscevo bene i "giovani" del team, Fernando Amman, Giorgio Ghigo e Giancarlo Sacerdoti in particolare.

LNF, 1991

Verso la fine degli anni ottanta, dopo un lungo periodo in cui la fisica delle alte energie

non veniva più fatta ai LNF, anche se ricercatori dei LNF partecipavano ad essa nei grandi laboratori del mondo, era tornato un forte desiderio di costruire a Frascati un nuovo acceleratore, corredato di un moderno rivelatore per fare ricerca fondamentale nel laboratorio dove il primo dei nuovi acceleratori era stato ideato, progettato e costruito. Parlo di Adone, il primo collisore di elettroni e positroni di alta energia, allora 3 GeV, che guidati dall'entusiasmo di Touschek i suoi giovani collaboratori avevano costruito negli anni sessanta. Adone, il capolavoro di Fernando Amman, come dice Carlo Bernardini, cominciò a funzionare nel 1968. Nonostante i primitivi esperimenti, ad Adone furono scoperti i quark, con l'aiuto dell'intuizione di Nicola Cabibbo. Burton Richter, non un grande ammiratore di Frascati a cui fra l'altro contende l'irrelevanza di ADA ed il primato nel fare collidere due fasci (Stanford era riuscito a collidere elettroni contro elettroni in due anelli tangenti nel 1963) tuttavia scrive (1984, lezioni al SLAC Summer Institute, SLAC-PUB-3659, Apr 1985) che uno dei risultati più eccitanti di quegli anni furono le prime misure con Adone. Queste furono quasi contemporanee con le misure a SLAC di Friedman, Kendal and Taylor, anch'esse interpretate come prova dell'esistenza dei quark. Quei due risultati portano all'inizio di una nuova era della fisica e rendono per sempre irrilevante lo studio dei cosiddetti fattori di forma di protoni e neutroni.

Nel dicembre del 1989 fui invitato ad una riunione presso la presidenza dell'INFN per discutere la possibilità di costruire a Frascati un collisore e^+e^- e gli argomenti di fisica che si potevano studiare con esso. La soluzione più appropriata alle possibilità dell'INFN ed alle strutture già esistenti a Frascati era chiaramente la costruzione di una cosiddetta ϕ -factory o fabbrica di ϕ . Una fabbrica di ϕ è un collisore di positroni ed elettroni operante ad una energia totale di 1020 MeV. Nelle collisioni frontali a questa energia il mesone ϕ di massa 1020 MeV viene prodotto in

modo risonante con elevata probabilità, cioè grande sezione d'urto.

Reazioni con sezione d'urto σ avvengono, a un collisore di luminosità \mathcal{L} , con frequenza $\sigma\mathcal{L}$. La sezione d'urto per la reazione $e^+e^- \rightarrow \phi$ è $3 \mu\text{b}$ ($1 \mu\text{b} = 10^{-30} \text{ cm}^2$). Con $\mathcal{L} = 1000 \text{ 1}/\mu\text{b/s}$ vengono prodotti 3000 mesoni ϕ per secondo. In un anno, circa 3×10^7 secondi, vengono prodotti 9×10^{10} , 90 miliardi, di mesoni ϕ . In pratica l'efficienza di funzionamento di una macchina su lunghi periodi è circa $1/3$. Possiamo quindi contare su 30 miliardi di ϕ . I mesoni ϕ decadono in $K_S + K_L$ circa 34 volte su cento ed in coppie K^+K^- 50 volte su cento: in un anno vengono prodotti 10,2 miliardi di K_S , lo stesso numero di K_L e 15 miliardi di coppie K^+K^- . Con un rivelatore ideale, possiamo esaminare in dettaglio la sorte di un grandissimo numero di mesoni K , carichi e neutri, e studiarne le loro proprietà con grande precisione.

Nel 1990 l'INFN, sotto la presidenza di Nicola Cabibbo, diede approvazione ufficiale per la costruzione del nuovo collisore, battezzato DAΦNE, una fabbrica di ϕ capace di luminosità iniziale attorno a $n \times 10 \text{ 1}/\mu\text{b/s}$ nel 1995 e di raggiungere $\mathcal{L} = 500 \text{ 1}/\mu\text{b/s}$ nel 1997 e con ulteriori miglioramenti superare i $1000 \text{ 1}/\mu\text{b/s}$, secondo il progetto della divisione acceleratori dei LNF, vedi ref. 1.

DAΦNE

Il complesso di acceleratori che costituiscono DAΦNE è illustrato in fig. 1. La parte cruciale del

collisore consiste di due anelli di accumulazione nei quali circolano 120 pacchetti di elettroni e positroni. Ciascuno dei pacchetti incrocia, una volta sola per ogni giro, il corrispondente pacchetto nell'altro anello, minimizzando gli effetti di frequenti incroci. DAΦNE non è quindi il collisore immaginato e costruito da Touschek e collaboratori all'inizio della storia dei LNF, nel quale elettroni e positroni vengono accumulati nello stesso anello.

Poiché è tuttora impossibile aumentare senza limiti il numero di particelle nei pacchetti che circolano nell'accumulatore è necessario, per ottenere altissime luminosità, aumentare il numero di pacchetti negli anelli ed usare due anelli separati per limitare il numero di incroci dei pacchetti. Su questo principio si basano i tre collisori entrati in funzione nel 1999, DAΦNE appunto e le due "B-factories" PEP-II negli USA e KEKB in Giappone.

In DAΦNE elettroni accelerati in un LINAC all'energia finale di 510 MeV, vengono temporaneamente accumulati in un anello intermedio e poi iniettati nell'anello per elettroni di DAΦNE in uno dei 120 pacchetti.

Il processo per positroni è più tortuoso. Elettroni accelerati in una prima sezione del LINAC interagiscono con un bersaglio intermedio creando positroni. Questi vengono catturati nella seconda parte del LINAC, accelerati sino a 510 MeV, accumulati e finalmente iniettati in uno dei pacchetti nell'anello dei positroni di DAΦNE. I due anelli del collisore sono montati nella sala di ADONE, fig. 2, il glorioso collisore da 3 GeV dei LNF, che alla fine degli anni 60, insieme all'espe-

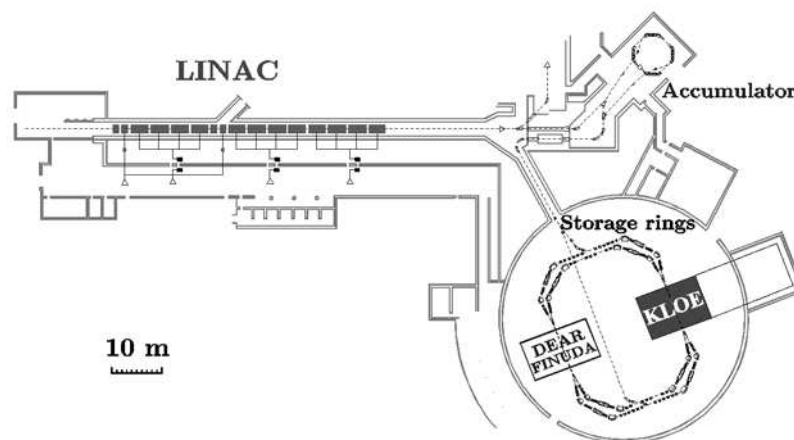


Fig 1
I componenti di DAΦNE.



Fig. 2.
La sala di Adone

rimento di scattering inelastico di Friedman, Kendal and Taylor condotto a SLAC, diede prova dell'esistenza dei quark.

L'intensità dei fasci decresce rapidamente col tempo, il ciclo di accumulazione descritto viene quindi ripetuto varie volte per ora. Un collisore è caratterizzato dalla sua luminosità \mathcal{L} , definita da numero di collisioni per secondo = $\mathcal{L} \times$ sezione d'urto, la vita media dei fasci negli anelli e la radiazione di fondo prodotta dalle particelle accumulate che escono dalle orbite di equilibrio.

La radiazione di fondo, che interferisce con l'esecuzione delle misure di interesse, cresce per vite medie brevi. Vite medie brevi risultano anche in riduzione della luminosità media del collisore e nella necessità di frequenti cicli di accumulazione. È facile capire che un acceleratore che richiede le operazioni descritte è una macchina estremamente complessa e difficile da operare efficientemente. Anche se molte operazioni sono sotto il controllo di calcolatori veloci, gli operatori della macchina sono sempre molto occupati.

La macchina dovendo funzionare per lunghi periodi, dell'ordine di anni, è piuttosto delicata. Luminosità e fondi debbono essere mantenuti il più costanti possibile per permettere di raccogliere campioni uniformi delle reazioni di interesse. Soprattutto, è necessario controllare l'energia dei fasci, tipicamente entro frazioni di una parte per mille. È quindi necessaria molta collaborazione fra il gruppo di fisici che controllano il funzionamento della macchina ed il gruppo di ricercatori che mantengono in funzione il rivelatore da essi costruito, controllano la sua perfetta

calibrazione, elaborano i dati raccolti con grandi impianti di calcolatori ed infine dai dati estraggono i valori delle grandezze fisiche d'interesse. Questa collaborazione esiste a livello automatico, per mezzo di calcolatori che si parlano fra loro, grazie naturalmente ai programmi scritti dai due team, e attraverso continui incontri fra i fisici di DAΦNE e KLOE.

La messa in funzione di DAΦNE fu particolarmente difficile. A parte il ritardo di 4 anni, quando KLOE incominciò a osservare interazioni tra i fasci nel 1999, trovò che la luminosità era 1/100 di quanto DAΦNE pensasse. Secondo il suo progetto, DAΦNE doveva produrre una luminosità di 5000 1/pb per anno già nel 1997. Nel 1999 DAΦNE raggiunse 2,42 1/pb per anno. Lentamente, anno per anno la luminosità migliorò arrivando nel 2005 a 1256 1/pb per anno. KLOE in 7 anni ha raccolto 2500 1/pb, circa 1/4 di quanto ci si aspettava di avere in due anni. Dal 2006 i fisici di KLOE dedicano la loro attività all'analisi dei dati raccolti ad allo studio di un rivelatore migliorato, nella speranza che DAΦNE raggiunga luminosità più alte.

KLOE

Per realizzare le potenzialità di DAΦNE un rivelatore "state-of-the-art" è necessario. Questo è particolarmente difficile alle energie di DAΦNE. La massima energia delle particelle è 510 MeV. A basse energie non è possibile usare filtri od altri metodi, tollerabile a energie più alte, per identificare la natura delle particelle

osservate. Grande cura va usata per rivelare particelle con la minima interferenza sul loro cammino.

La mia ultima esperienza in questo campo era stata la realizzazione del rivelatore DØ a Fermilab per il collisore di protoni e antiprotoni ad energia di 1800 GeV, alla fine degli anni 80. Con DØ scoprimmo il quark t , o "top", nel 1995, ref. 2. In DØ ero parte del "detector council" e fui responsabile della maggior parte del rivelatore. In particolare ridefinii i parametri dei calorimetri, elettromagnetico ed adronico, e fui responsabile di tutta l'elettronica di cui progettai personalmente gran parte. Come pure inventai gli algoritmi fondamentali per distinguere elettroni e fotoni da adroni, al livello di 1/1000, che permisero le misure di precisione della massa dei bosoni vettoriali W e Z . È chiaro quanto diverso doveva essere KLOE, dove la massima energia è duecento volte più piccola, quasi come quella del sincrociclotrone di Nevis, Columbia University, dove Juliet ed io studiammo muoni da 100 MeV.

Nell'estate del 1991 nacque la Collaborazione KLOE, di cui facevano parte ricercatori dell'Università e Sezione INFN di Bari, dei LNF di Frascati, dell'Università di Karlsruhe-Germania, dell'Università e Sezione INFN di Lecce, dell'Università Columbia University di New York - USA, dell'Università di Perugia, dell'Università e Sezione INFN di Pisa, dell'Università e Sezione INFN di Roma, dell'Università e Sezione INFN di Roma 2, dell'ISS e sezione INFN dell'ISS di Roma, dell'Università SUNY at Stony Brook - USA, dell'Università e Sezione INFN di Trieste. Sergio Bertolucci era il direttore tecnico del progetto e Juliet Lee-Franzini coordinatore dell'analisi. Entro la fine del 1991, la collaborazione presentò al direttore dei LNF, Enzo Iarocci, una let-

tera di intenti, un progetto preliminare del rivelatore ed il programma di fisica d'interesse.

Una proposta tecnica preliminare venne preparata pochi mesi dopo. Il rivelatore doveva essere pronto per l'inizio del 1996, fig. 3. Il costo di KLOE, stimato nel marzo 1992 era di 58.997 milioni di Lire di "quel momento", che un anno dopo persero circa il 30% del loro valore. Fondi per la costruzione di KLOE non furono stanziati prima dell'inizio del 1993, creando uno squilibrio tra la data del progetto di DAΦNE e la possibilità di avere un rivelatore pronto e necessitarono economie a scapito di performance. La proposta tecnica di KLOE è datata all'inizio del 1993, vedi ref. 3.

Comunque, 5 anni dopo, nell'estate del 1998, KLOE era stato progettato, costruito, calibrato, corredato del suo sistema di raccolta dati e di trasmissione ai corrispondenti calcolatori ed era in attesa in sala di assemblaggio, fig. 4, per la fine del periodo di collaudo di DAΦNE, uno sbaglio terribile, che si sarebbe dovuto evitare. Nel progetto iniziale, DAΦNE doveva iniziare a funzionare a luminosità ridotta nel 1995 per raggiungere nel 1997 la luminosità di progetto, $\mathcal{L}=500$ 1/ $\mu\text{b/s}$. Per varie ragioni, anni di ritardo furono accumulati. Fu così che finalmente muovemmo KLOE in sala DAΦNE tra Natale 1998 e capodanno del 1999, mentre il team di DAΦNE si prendeva un meritato riposo.

Nei sette anni successivi, cominciando con luminosità quasi nulle DAΦNE raggiunse nel 2006 un livello di circa 1/4 del valore minimo di progetto. KLOE ha raccolto dati preziosi coi quali è stato possibile arrivare al ritratto del ventesimo secolo della "stranezza", proprietà fondamentale dei quark strani, s , particelle intuite inizialmente dalle proprietà dei mesoni K scoperti 61 anni fa.

20 Marzo '92, P.F. 52

- Est. '95: Fasci in DAΦNE
- Fine '92: Progetto EMC centrale compl.
- 1 gen '93: Inizio Produzione EMC centrale
- 31 dic '95: Costruzione rivelatore è completa
- 1 gen '96: Rivelatore si muove in sala DAΦNE
- 1 feb '96: Inizio primo run a $\mathcal{L}\sim 10^{32}$
- 1 giu '96: 4 mesi di dati raccolti a $\mathcal{L}\sim 10^{32}$

Fig. 3

Cronologia per la costruzione di KLOE. Presentazione alla CSN I, 20 marzo 1992.



Fig 4

Sala di assemblaggio di KLOE. La sala di controllo di KLOE è all'ultimo piano. La cupola di ADONE è visibile sullo sfondo.

La progettazione, costruzione ed il collaudo di KLOE fu una vera saga che forse un giorno qualcuno vorrà raccontare, non dimenticando la svalutazione della lira nel '93 e la crisi mondiale dell'approvvigionamento del ferro nel '95 che più che raddoppiò il costo del giogo magnetico di KLOE, per non parlare del ritardo. Cercheremo invece nel seguito di trasmettere al lettore non specialista "l'essenza" di KLOE per permettergli di apprezzare il ruolo che un esperimento completo come KLOE assume nella spinta verso le ultime frontiere del sapere.

Dettagli di KLOE

KLOE racchiude un volume interno enorme, circa 150 metri cubi, fig. 5 e venne assemblato a Frascati nella sala di assemblaggio KLOE. Le sue dimensioni non sono molto diverse da quelle dei rivelatori "general purpose" costruiti per il collisore LEP al CERN. Siccome l'energia di LEP è circa 100 volte quella di DAΦNE questo può sembrare esagerato. Le complessità di KLOE sono motivate dalla necessità di ottenere misure di elevate precisioni.

Le sue dimensioni sono invece determinate dalla vita media dei mesoni K_L , ~51 ns. In questo intervallo di tempo un K_L prodotto a DAΦNE, viaggia in media 3,5 m. Per osservare un numero accettabile di decadimenti il rivelatore deve aver un grande raggio e la scelta di KLOE è 2 m.

Camera a deriva

Osservare un decadimento significa osservare le particelle prodotte nel decadimento. Particelle cariche, nell'attraversare un gas, lasciano una scia di ionizzazione. In una camera a deriva è possibile osservare tale scia e misurare la sua distanza da fili caricati ad un elevato potenziale elettrico positivo, i così detti "sense wires". La camera a deriva di KLOE è un cilindro di 4 m di diametro, lungo ~3,5 m. Le due estremità del cilindro sono chiuse da segmenti di sfera tra cui 52.000 fili sono tesi con una tensione totale di 3500 kg. 12.500 di questi fili sono a potenziale positivo e determinano punti in 3-D lungo la traiettoria di una particella carica. La camera a deriva di KLOE è la più grande nel mondo ed è costruita interamente con fibre di carbonio. Nel campo magnetico della bobina superconduttrice, l'impulso delle particelle cariche è misurato con accuratezza dello 0,4%. La risoluzione spaziale è migliore di 200 μm nella coordinata ϕ , vedi ref. 4.

Calorimetro

Tutti i mesoni K decadono frequentemente in pioni neutri i quali a loro volta decadono in due fotoni. È quindi necessario rivelare la presenza di fotoni, misurarne l'energia e la direzione di emissione. I fotoni vengano osservati nel calorimetro elettromagnetico a campionamento, EMC,

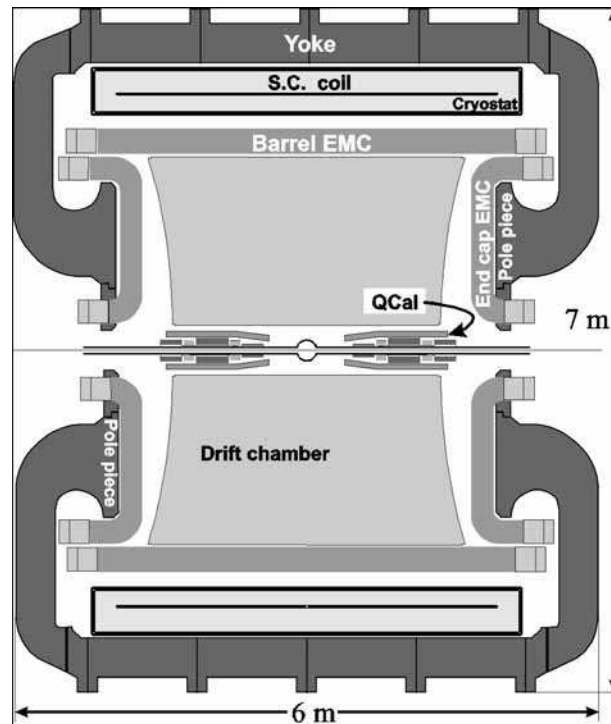


Fig. 5

Sezione verticale del rivelatore KLOE. DC è la camera a deriva, EMC il calorimetro elettromagnetico, SC la bobina superconduttrice, Yoke il giogo del magnete.

dove producono sciame elettromagnetici in strati di piombo di 0,5 mm di spessore. Il piombo si alterna con strati di fibre plastiche scintillanti. Elettroni e positroni producono luce di scintillazione nell'attraversare le fibre, luce che viene guidata dalle fibre sulle finestre di fotomoltiplicatori che convertono luce in segnali elettrici. L'ampiezza dei segnali fornisce la misura dell'energia del fotone. La posizione di ingresso del fotone nel calorimetro viene ricostruita misurando la differenza in tempo dei segnali ai due estremi delle fibre. La media dei due tempi da il tempo di volo del fotone all'arrivo sul calorimetro. Misure di tempi vengono anche usate per particelle cariche, permettendo misure di velocità che, combinate con misure d'impulso, determinano la massa della particella, vedi ref. 5.

Camera a vuoto dei fasci

La regione del collisore dove i fasci collidono in DAΦNE è particolarmente delicata in quanto si deve evitare che mesoni K_S si "rigenerino" in mesoni K_L . La camera a vuoto attorno alla zona di interazione è una sfera di 10 cm di raggio,

vedi fig. 6, costruita in lega di alluminio e berillio. L'ampiezza dei K_S è ridotta di circa un fattore 9000 alle pareti della sfera. Coerenza ed interferenza quantistica sono in tale modo indisturbate. Lo spessore delle pareti della camera a vuoto è 0,5 mm, per limitare il degrado delle particelle prima che raggiungano la parte attiva del rivelatore.

Trigger

Per evitare di raccogliere eventi di scarso interesse KLOE è dotato di un sistema di "trigger" che riconosce eventi di interesse prima di iniziare le operazioni di digitalizzazione dei 30.000 segnali del rivelatore e l'invio dei risultati ai calcolatori per la loro elaborazione. Il trigger di KLOE riconosce decadimenti di mesoni ϕ , e accetta anche una frazione di eventi "Bhabha" necessari per misure di luminosità e per la calibrazione del rivelatore. Eventi dovuti a raggi cosmici vengono riconosciuti ed rigettati, vedi ref. 6. Il sistema di trigger compie anche una misura veloce della luminosità che viene passata a DAΦNE per controllo dell'operazione. Una

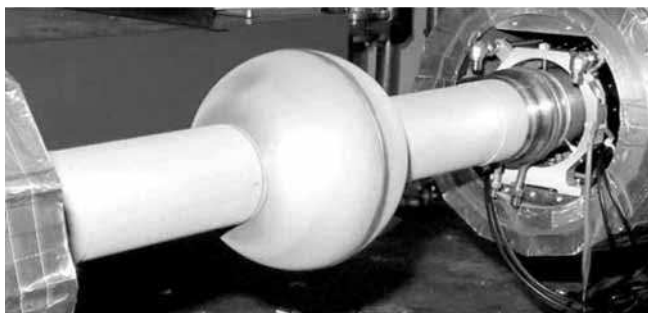


Fig. 6
Camera a vuoto.

misura di precisione della luminosità \mathcal{L} è ottenuta con eventi Bhabha a grande angolo, ref. 7.

Acquisizione dati

A valori della luminosità di $100 \text{ 1}/\mu\text{b/s}$, eventi di interesse avvengono con una frequenza di $\sim 2200 \text{ Hz}$, dei quali 300 Hz sono decadi-

menti di ϕ . Tutti i segnali digitali del calorimetro, camera a deriva e i sistemi di calibrazione e monitoraggio, prodotti dall'elettronica di front-end montata sul giogo magnetico di KLOE, vengono inviati attraverso fibre ottiche ai calcolatori di KLOE accanto alla sala di controllo di KLOE. Qui è possibile osservare gli eventi nel rivelatore ricostruiti in tempo reale. Due eventi sono mostrati in fig. 7.

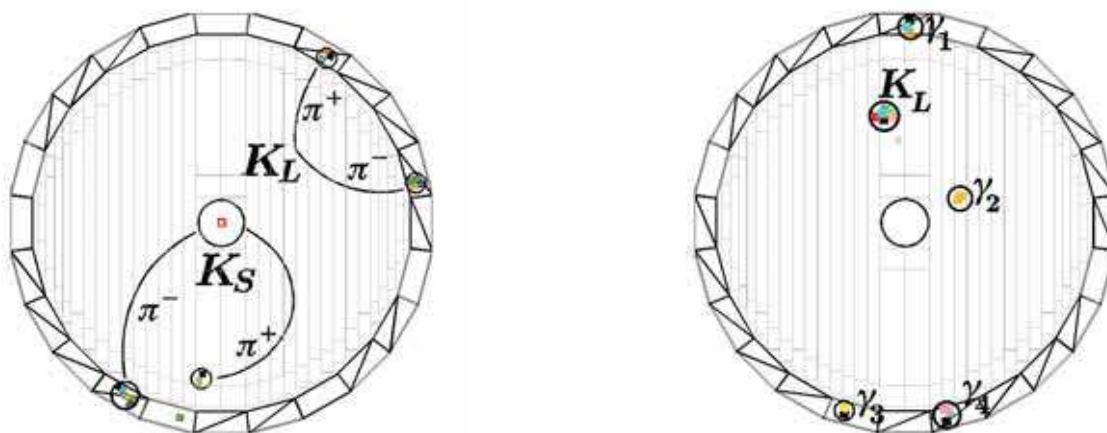


Fig. 7

Due eventi in KLOE. A sinistra. $\phi \rightarrow K_S K_L, K_S K_L \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+ \pi^-$. A destra $\phi \rightarrow K_S K_L, K_S \rightarrow \pi^0 \pi^0 \rightarrow \gamma_1 \gamma_2 \gamma_3 \gamma_4$, il K_L interagisce nel calorimetro.

I dati pervenuti dal rivelatore vengono correttamente messi insieme evento per evento e registrati in enormi librerie robotizzate di nastri magnetici, insieme ad eventuali dati di fondo, costanti di calibrazione e così via. Inoltre ogni evento viene ricostruito. Vengono cioè riconosciute tracce di particelle, i loro impulsi, le energie e posizioni di arrivo sul calorimetro dei fotoni. I risultati vengono anch'essi registrati nelle librerie ed una prima classificazione dei tipi di

eventi viene eseguita. Infine il comportamento del rivelatore viene simulato con tecniche di Monte Carlo (MC) generando eventi di vari tipi, producendo simulazioni dei segnali che il rivelatore produce nel mondo reale e ricostruendo il risultato. È possibile in questo modo ottenere qual'è l'efficienza di KLOE nel ricostruire e classificare gli eventi reali. Tutto questo viene fatto su potentissimi calcolatori che eseguono programmi scritti dai fisici della collaborazione KLOE. L'in-

vestimento in questi programmi rappresenta il lavoro di centinaia di uomo-anno, vedi ref. 8.

Un ulteriore passo nell'analisi prepara somari, sia dei dati che della simulazione di MC, che sono più maneggevoli per le analisi finali. Capita spesso però che uno debba tornare ai dati originali. Il MC di KLOE è di aiuto fondamentale in ogni analisi di KLOE. Per iterazione permette un continuo miglioramento della nostra comprensione di KLOE e della accuratezza dei risultati finali. Questo aspetto di KLOE è descritto nella ref. 9.

La fisica di KLOE

La fisica di KLOE copre un campo molto grande. Abbiamo fatto misure di precisione, le più precise del mondo, di parametri fondamentali, per esempio le masse di alcuni mesoni e le loro vite medie. Abbiamo anche incominciato lo studio della validità dei principi base della meccanica quantistica. Abbiamo tre soggetti di particolare interesse. Uno è lo studio delle interazioni deboli e verifiche della accuratezza del settore elettro-debole del modello standard.

Un'altro è lo studio della spettroscopia nel modello a quark, in particolare le proprietà dei mesoni pseudo - scalari leggeri quali η ed η' e lo studio dei mesoni scalari, a oggi ancora non ben compresi, quali f_0 , a_0 ed anche σ e κ .

Infine KLOE ha un ambizioso programma di misure di precisione della sezione d'urto adronica da soglia sino ad 1 GeV. Queste misure sono necessarie per poter ottenere le correzioni adro-

niche alla funzione spettrale del fotone, cosa che la complessità della Cromo Dinamica Quantistica non permette di calcolare esplicitamente.

Misure di masse

Grazie alla purezza della produzione di mesoni K nel decadimento $\phi \rightarrow K_S + K_L$, alla semplicità del decadimento $K_S \rightarrow \pi^+ \pi^-$, alla possibilità di calibrazione continua del rivelatore con eventi elastici $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ e alla piccola differenza tra $M(\phi)$ e $2M(K_S)$, KLOE può misurare $M(K_S)$ con una accuratezza di 0,4 MeV per un singolo evento. 10.000 eventi portano quindi ad un errore statistico di 4 keV, ossia dell'ordine di 8 ppm. Una limitazione viene dalla calibrazione iniziale della scala di KLOE cioè della conoscenza della massa del mesone ϕ .

Questa massa è stata misurata a Novosibirsk con il metodo della risonanza depolarizzante basata sul valore dell'anomalia magnetica dell'elettrone, $a = (g-2)/2$. L'anomalia dell'elettrone è il numero più preciso in fisica oggi: $a(e) = 0,0011596521859 \pm 0,0000000000038$. Da questo numero Novosibirsk deduce $M(\phi) = 1019,483 \pm 0,011 \pm 0,025$ MeV, valore che KLOE usa per riferimento.

Una seconda limitazione viene dalla necessità di tener conto delle correzioni radiative. A questi livelli di accuratezza calcoli molto precisi sono necessari e le correzioni appaiono due volte: nel processo Bhabha e nella reazione $e^+e^- \rightarrow \phi$. La fig. 8 illustra la risoluzione nella misura della massa dei mesoni K_S .

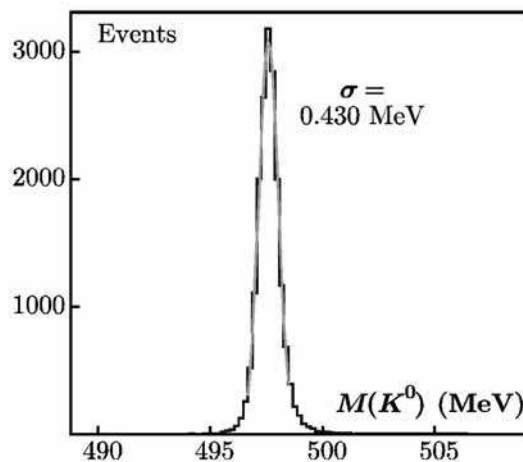


Fig. 8.
Massa del mesone K_0

La larghezza osservata è dovuta alla dispersione intrinseca dell'energia di DAΦNE e ad effetti radiativi. Dall'analisi di uno scan del picco del mesone ϕ a DAΦNE, KLOE, ref. 10, ottiene il risultato $M(K^0)=497,583\pm 0,005\pm 0,020$ MeV, che è migliore di quello dato dal Particle Data Group (PDG) nella ref. 11.

KLOE ha anche misurato la massa del mesone η . In questo caso oltre che alla calibrazione eccezionalmente precisa di KLOE, possiamo sfruttare l'ottima risoluzione angolare, $0,4^\circ$, nella misura degli angoli di fotoni di energia media in KLOE. Nella reazione $\phi \rightarrow \gamma\eta$, $\rightarrow 3\gamma$ il fotone di rinculo ha un impulso di 363 MeV e l'angolo di apertura tra i due fotoni da $\eta \rightarrow \gamma\gamma$, centrato attorno a 113° , fornisce una misura della massa dell'h. Dallo studio di circa 20.000 eventi di questo tipo KLOE trova, vedi ref. 10, $M(\eta)=547,874\pm 0,007\pm 0,029$ MeV, un risultato più preciso di quanto riportato dal PDG nella ref. 11.

Misure di vita media

È particolarmente difficile eseguire misure di vita media, τ , di particelle neutre, per due ragioni. Non è possibile avere un segnale del passaggio di una particella neutra senza profondamente alterarne i parametri dinamici o addirittura distruggerla. Non è in generale possibile produrre un fascio di particelle neutre di impulso definito. Ambedue i punti sopra sono risolti a DAΦNE con un fascio di mesoni K_L prodotti nella reazione $e^+e^- \rightarrow K_S K_L$ seguita dalla rivelazione del decadimento $K_S \rightarrow \pi^+\pi^-$. La reazione avviene a riposo, quindi i K_L (e K_S) sono monocromatici. I K_S decadono in $\pi^+\pi^-$ in pochi millimetri di cammino circa $2/3$ del tempo. L'osservazione di un decadimento $K_S \rightarrow \pi^+\pi^-$ ci avverte che un K_L , monocromatico è stato prodotto. Quindi abbiamo un fascio monocromatico di K_L . Osservando il numero di decadimenti in funzione della distanza, è facile estrarre la vita media.

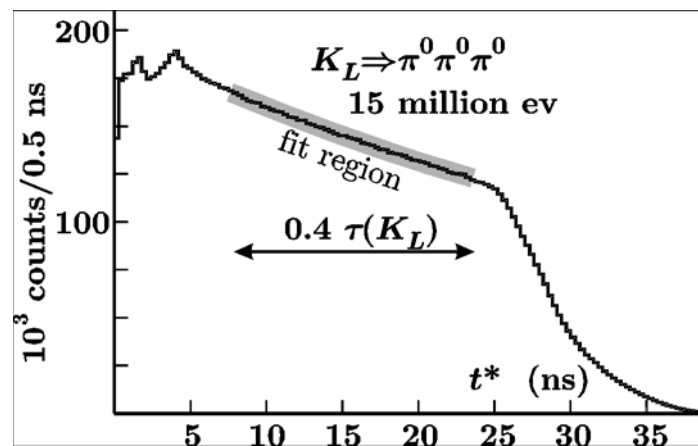


Fig. 9

Curva di decadimento

Fig. 9 mostra la distribuzione dei decadimenti $K_L \rightarrow \pi^0\pi^0\pi^0$ in funzione del tempo. Dai dati in figura ed altri canali, si ottiene, vedi ref. 12, $\tau(K_L)=50,84\pm 0,23$ ns, che rappresenta un notevole miglioramento sul valore $51,54\pm 0,44$ ottenuto nel 1967 con un esperimento interamente dedicato a tale scopo, ref. 13. Va anche notato che la misura della vita media del K_L è particolarmente difficile in KLOE che ricopre soltanto il 40% del tempo medio di decadimento.

La vita media dei mesoni K carichi è molto più facile da misurare ma i risultati ottenuti da esperimenti dedicati alla sua misura, eseguiti

negli anni 1965 - 95 sono in notevole disaccordo fra loro, vedi PDG in ref. 11. KLOE ha eseguito quattro misure indipendenti trovando, vedi ref. 14, $\tau(K^\pm)=12,347\pm 0,030$ ns, valore certamente più affidabile che non la media di risultati fra loro inconsistenti.

La larghezza leptonica del mesone ϕ

Misure dirette di questo parametro fondamentale non erano mai state fatte, anche perché la misura è difficile e assai delicata. KLOE ha

misurato l'asimmetria avanti-indietro della reazione $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ e la sezione d'urto per la reazione $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ attorno alla risonanza. Ambedue misurano l'interferenza tra il processo diretto ed il processo attraverso produzione e decadimento del mesone vettoriale ϕ . KLOE, vedi ref. 15, misura: $\Gamma(\phi \rightarrow ll) = 1,320 \pm 0,023$ keV.

Mesoni K^0 e la meccanica quantistica

KLOE a DAΦNE può verificare le proprietà della meccanica quantistica (QM). L'osservazione del decadimento del mesone ϕ in un K_L (K_S) garantisce la presenza di un K_S (K_L) emesso nella direzione opposta, fornendo l'opportunità unica di preparare un fascio puro di K_S . In KLOE in particolare si può sfruttare l'ottima risoluzione temporale del calorimetro per riconoscere la produzione di un K_S dall'osservazione di un K_L che viaggia a circa un quinto della velocità della luce e quindi garantire la presenza di un K_S .

KLOE è unico al mondo nell'aver a disposizione un fascio puro di mesoni K_S monocromatici. Questo permette ricerche di decadimenti rarissimi o proibiti. In particolare KLOE ha raccolto un grande campione di decadimenti semi-leptonici dei K_S , $K_S \rightarrow \pi \mu \nu$, un decadimento mai osservato nel passato.

Nel formalismo della QM, fenomeni di interferenza appaiono nell'osservazione dei decadimenti di ambedue i kaoni prodotti. In particolare la distribuzione della differenza dei tempi in cui ambedue i K decadono in due pioni, contiene tre termini: il decadimento del K_L e del K_S ed un termine d'interferenza che la QM richiede perchè gli stati K nel decadimento del mesone ϕ sono coerenti. Un test della QM consiste nella verifica se vi sia perdita di coerenza. Il termine di interferenza viene moltiplicato nel fattore $(1-\zeta)$. Se la meccanica quantistica è corretta vale $\zeta=0$. Dai dati raccolti con KLOE, vedi ref. 16 si ottiene la distribuzione in fig. 10. Dalla distribuzione si ottiene $\zeta = (0,1 \pm 0,2 \pm 0,04) \cdot 10^{-5}$, e quindi la QM è soddisfatta, ref 16.

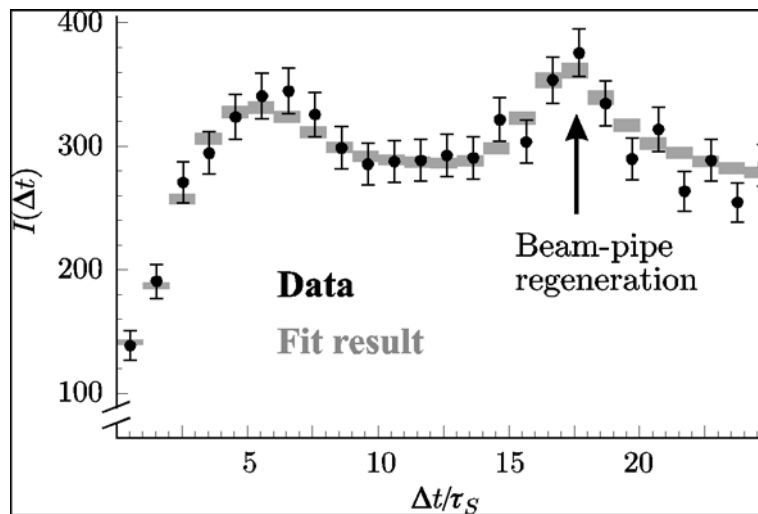


Fig. 10.

Distribuzione della differenza Δt , per eventi $\phi \rightarrow K_S + K_L \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+ \pi^-$

Le interazioni deboli

KLOE, avendo a disposizione fasci puri, identificati di mesoni K_S , K_L e K^+K^- , offre occasioni uniche per lo studio di precisione delle interazioni deboli del quark 's' che, confrontate col decadimento nucleare β permettono di testare le ipotesi fondamentali su cui il cosiddetto modello standard (SM) è costruito. Un problema rimasto irrisolto dopo la scoperta della violazione

della simmetria CP (C per coniugazione di carica e P per parità) a Brookhaven nel 1964, vedi ref. 17, era la questione della violazione di CP diretta. In altre parole era in principio possibile attribuire l'effetto osservato da Fitch e Cronin ad una nuova interazione super debole la cui unica conseguenza era di indurre transizioni $K \rightleftharpoons \text{anti-K}$ con diverse probabilità nelle due direzioni invece che alle interazioni deboli.

Nel modello standard la violazione di CP è dovuta ad una fase nella matrice di Cabibbo-Kobayashi-Maskawa (CKM) che mescola i sapori dei quark. In questo caso i rapporti delle frazioni di decadimento dei K_S e K_L sarebbero diversi:

$$\text{BR}(K_S \rightarrow \pi^+ \pi^-) / \text{BR}(K_S \rightarrow \pi^0 \pi^0) \neq \text{BR}(K_L \rightarrow \pi^+ \pi^-) / \text{BR}(K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0).$$

Questa possibilità, chiamata violazione diretta di CP doveva essere investigata da KLOE, richiedendo una luminosità integrata di 20.000 $1/\text{pb}$ che DAΦNE non è stato in grado di produrre. Tuttavia lo studio delle proprietà dei mesoni K permette molte verifiche del modello standard in particolare dell'ipotesi fondamentale che la carica debole di tutti i fermioni è identica, ipotesi che porta all'universalità leptonica ed all'unitarietà della matrice di mescolamento. Formalmente questo si esprime nell'accoppiamento dei bosoni vettoriali W^\pm alla corrente dei leptoni e dei quark con una unica costante di accoppiamento g , la carica debole. I quark appaiono con la matrice di mescolamento di Cabibbo-Kobayashi-Maskawa (CKM), V_{CKM} , che è unitaria, ref. 18, 19. A basse energie, come nei decadimenti β nucleari e nei decadimenti semileptonici dei mesoni π e K , g è connessa alla costante di Fermi G_F da $G_F = g^2 / (4\sqrt{2}M_W^2)$. I termini di accoppiamento col bosone vettoriale che possiamo studiare con quark e leptoni, sono: $g(e)$, $g(\mu)$, $g(q)V(ud)$, $g(q)V(us)$. L'unitarietà della matrice di CKM richiede $|V(ud)|^2 + |V(us)|^2 = 1$ (entro $1/10.000$, ref. 20). Inoltre possiamo verificare l'universalità o uguaglianza delle cariche deboli dei fermioni: $g(e) = g(\mu) = g(q) = g$.

Una delle missioni di KLOE è la misura completa di tutti i parametri di cui sopra e quindi la verifica dell'universalità leptonica, dell'unitarietà di V_{CKM} e che la carica debole dei quark è uguale a quella dei leptoni. Un problema è il fatto che non abbiamo a disposizione fasci di quark ma dobbiamo lavorare con pioni e kaoni. Tuttavia è finalmente possibile calcolare parte degli effetti dovuti al fatto che i quark sono legati in adroni. Il problema è simile a quello della diffusione elettrone protone, di moda molti anni fa. Il fatto che la carica del protone è distribuita in una regione finita di spazio risulta nella presenza di fattori di forma che sopprimono la diffusione a grandi impulsi trasferiti.

I processi più convenienti per misurare g e V_{CKM} sono i decadimenti semileptonici $K \rightarrow \pi e \nu$,

$K \rightarrow \pi \mu \nu$. La corrente $K \rightarrow \pi$ acquista un fattore di forma, funzione dell'impulso trasferito. Nei decadimenti $K \rightarrow \pi$ il modulo quadrato del momento trasferito è positivo ad il fattore di forma cresce con esso, in maniera che si determina sperimentalmente dallo spettro del pione. In aggiunta il fattore di forma a momento trasferito nullo non è uguale a uno, perchè kaoni e pioni non hanno struttura identica. Quest'ultima correzione è calcolabile sul reticolo e solo recentemente risultati precisi sono stati ottenuti. Il rapporto $|V(us)|^2 / |V(ud)|^2$ è connesso al rapporto $\text{BR}(K \rightarrow \mu \nu) / \text{BR}(\pi \rightarrow \mu \nu)$ attraverso le costanti di decadimento di kaoni e pioni, f_K , f_π , anch'esse recentemente calcolate sul reticolo.

KLOE ha misurato tutte le frazioni assolute di decadimento dei mesoni K_S , K_L e K^\pm , inclusive di radiazione e le vite medie come descritto sopra, da cui si ottengono le larghezze parziali. KLOE ha anche misurato la dipendenza dei fattori di forma dal valore dell'impulso trasferito.

Decadimento dei K_S

I modi di decadimento dominanti sono stati misurati da KLOE, usando il fascio puro di K_S . I risultati sono pubblicati nelle ref. 21 e 22. Vi sono anche modi molto rari come $K_S \rightarrow 3\pi^0$ che viola l'invarianza sotto CP. KLOE trova il limite $\text{BR} \leq 1,2 \cdot 10^{-7}$, ref. 23, il più stringente mai ottenuto.

Decadimenti dei K_L

I decadimenti $K_L \rightarrow \pi e \nu$, $\rightarrow \pi \mu \nu$, $K_L \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$ e $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0 \pi^0$ da soli sono più del 99,5% di tutti i decadimenti. I primi tre modi, con due particelle cariche nello stato finale sono identificati dal bilancio energetico del decadimento. La figura 11 mostra la separazione fra i tre modi principali. Circa 13 milioni di decadimenti di K_L puri, selezionati dall'osservazione del decadimento $K_S \rightarrow \pi^+ \pi^-$, sono usati per le misure delle frazioni di decadimento. Il decadimento $K_L \rightarrow 3\pi^0$ è relativamente facile da identificare, osservando ≥ 3 fotoni da un'origine comune. L'efficienza è alta (99%) e il fondo è basso (1,1%), ref. 24. KLOE ha anche misurato le frazioni di $K_L \rightarrow \gamma \gamma$, vedi ref. 25 e $K_L \rightarrow \pi^+ \pi^-$ che viola l'invarianza di CP, ref. 26.

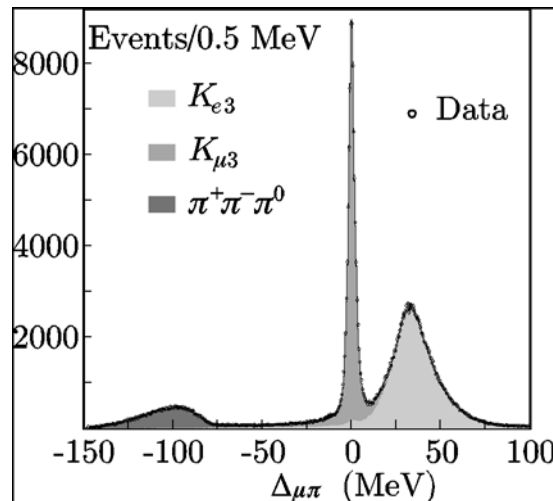


Fig. 11.
Bilancio energetico per $K_L \rightarrow$ due particelle cariche.

Decadimenti dei K carichi

I decadimenti dei K^\pm sono dominati dai modi muone-neutrino e pione carico-pione neutro. I decadimenti semileptonici sono solo l'8% del totale. KLOE ha misurato tutte le frazioni assolute, inclusive di radiazione, facendo uso del

fatto che l'osservazione di un K^+ (K^-) garantisce la presenza di un K^- (K^+) di cui si contano i diversi decadimenti. Un esempio di come si riconosce e conta l'occorrenza di decadimenti $K \rightarrow \mu\nu$ è illustrato in Fig. 12, vedi ref. 27. Le misure delle frazioni semileptoniche sono descritte nella ref. 28.

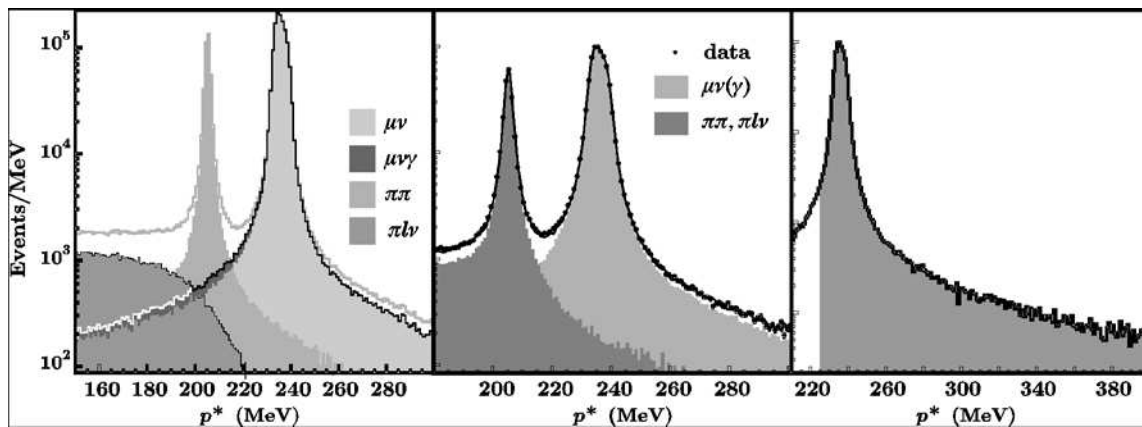


Fig. 12
Spettri del decadimenti $K \rightarrow \mu\nu$.

Fattori di forma

È necessario misurare lo spettro dei pioni di decadimento per ottenere i parametri dei fattori di forma dai quali si ottengono gli integrali normalizzati della densità di Dalitz, chiamati anche integrali dello spazio delle fasi. Dalle misure degli spettri nei decadimenti $K_L \rightarrow \pi e(\mu)\nu$, vedi

ref. 29 e 30, KLOE ottiene i valori per gli integrali che sono 3 volte più accurati dei precedenti.

Larghezze semileptoniche

Le larghezze semileptoniche dei mesoni K offrono il metodo migliore per ottenere $|V(us)|^2$.

Il teorema di Ademollo-Gatto, vedi ref. 31, garantisce che le correzioni dovute alla differenza di massa tra quark s e d sono nulle, al primo ordine. Rimangono tuttavia correzioni radiative e correzioni per la violazione di $SU(2)_I$ e $SU(3)_F$, ed il valore del fattore di forma a impulso trasferito nullo, vedi per esempio ref. 32. Dalla larghezza semileptonica KLOE ottiene $|V_{us}|^2 = 0,05002 \pm 0,00057$, come media dei valori ottenuti dalle 5 frazioni semileptoniche misurate. La recente misura $|V_{ud}|^2 = 0,9490 \pm 0,0005$, vedi ref. 33, combinata col risultato di KLOE da $\Delta = |V_{us}|^2 + |V_{ud}|^2 - 1 = -0,0009 \pm 0,0008$, compatibile con l'unitarietà entro lo 0,1.

$K \rightarrow \mu\nu$

Dalla misura di $K \rightarrow \mu\nu$, KLOE ottiene

$|V_{us}|^2 / |V_{ud}|^2 = 0,0541 \pm 0,0007$, usando i recenti risultati sul reticolo, ref. 34, e le correzioni radiative di W. Marciano, ref. 35.

Risultato finale

I risultati per $|V_{us}|^2$, $|V_{ud}|^2$ e $|V_{us}|^2 / |V_{ud}|^2$, possono essere combinati, come illustrato in fig. 13. Il risultato finale è $|V_{us}|^2 = 0,0506 \pm 0,0004$, $|V_{ud}|^2 = 0,9490 \pm 0,0005$ con $\chi^2 / \text{dof} = 2,34 / 1$ corrispondente a un livello di confidenza del 13%. L'unitarietà è adesso data da $D = |V_{us}|^2 + |V_{ud}|^2 - 1 = (4 \pm 7) \cdot 10^{-4}$ ($\sim 0,6$ deviazioni standard), verificata quindi a meglio dello 0,1%, ref. 36. Nel 2004 Gilman e Kleinknecht del PDG davano $\Delta = (33 \pm 15) \cdot 10^{-4}$, una violazione dell'unitarietà di $2,2 \sigma$, e di assai inferiore accuratezza, ref. 37.

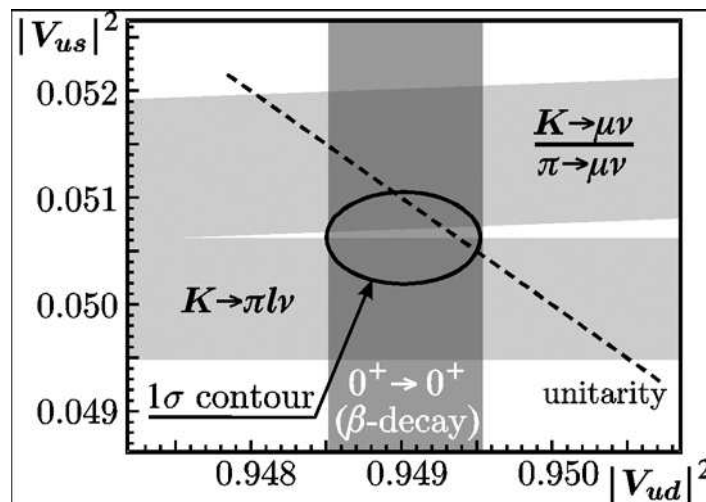


Fig. 13

Fit ai risultati di KLOE per $|V_{us}|^2$ e $|V_{us}|^2 / |V_{ud}|^2$ ed a $|V_{ud}|^2$ dal decadimento β nucleare. L'unitarietà, rappresentata dalla linea tratteggiata è chiaramente soddisfatta.

CPT

Le tre simmetrie discrete della meccanica quantistica, coniugazione di carica C , parità P e inversione temporale T sono violate in natura, da sole ed in coppie. Solo CPT rimane ancora una simmetria esatta. L'invarianza sotto CPT è garantita nella teoria dei campi che assume l'invarianza di Lorentz (spazio piatto), località e unitarietà, ref. 38. Verifiche della validità di CPT

sono sensibili alle assunzioni fondamentali della presente comprensione delle leggi della fisica delle particelle e delle loro interazioni.

Il sistema dei kaoni neutri permette test raffinati, in particolare la verifica dell'uguaglianza delle masse e larghezze di K e anti- K . I nostri nuovi risultati sui decadimenti dei K_S ref. 22, 23 e su $K_L \rightarrow 3\pi^0$ ref. 39, permettono di ridurre di un fattore due i limiti su ΔM , $\Delta\Gamma$ e $\Re\delta_K$ come pure di ottenere valori più precisi di ϵ_K , ref. 40, vedi fig. 14.

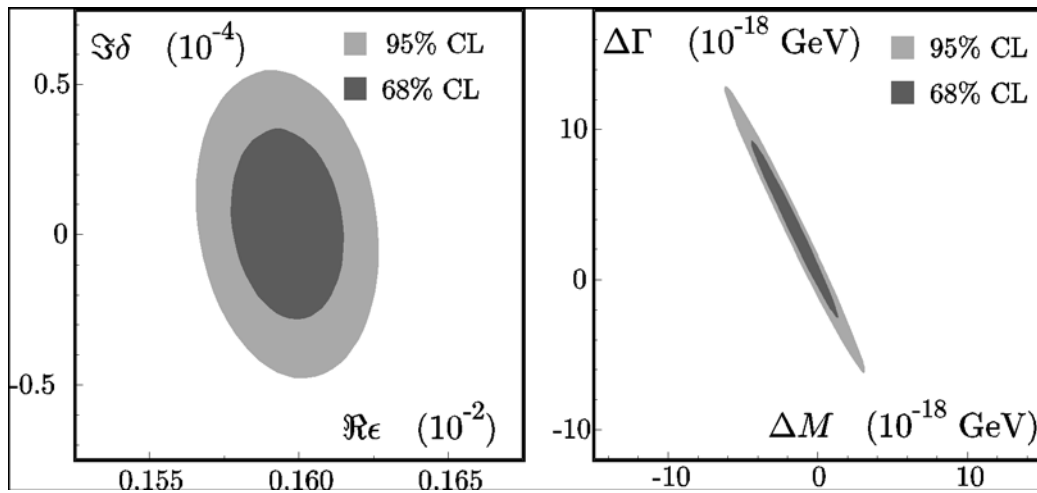


Fig. 14

Sinistra. Regioni permesse per $\Re\epsilon$ - $\Im\delta$. Destra. Idem, per ΔM - $\Delta\Gamma$.

Mesoni pseudo scalari: η e η'

L'1,7% dei mesoni ϕ decadono in $\gamma\eta$. KLOE ha raccolto 100 milioni di mesoni η identificati dal fotone di rinculo di 363 MeV. Lo studio dei dati, oltre alla determinazione della massa, permette verifiche dell'invarianza sotto C dei processi che inducono i decadimenti dell' η . Per processi proibiti KLOE ha ottenuto i limiti;

1. $BR(\eta \rightarrow 3\gamma) \leq 1,6 \cdot 10^{-5}$, al 90% CL, ref. 41, 40 volte inferiore al risultato precedente.
2. $BR(\eta \rightarrow \pi^+\pi^-) \leq 1,3 \cdot 10^{-5}$, al 90% C.L., ref. 42, 25 volte inferiore al risultato precedente.

KLOE ha anche studiato la dinamica del decadimento $\eta \rightarrow 3\pi^0$, ref. 43, e $\eta \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$, ref. 44. Quest'ultimo provvede un altro test di invarianza sotto C. L'asimmetria nelle energie del π^+ e π^- risulta inferiore allo 0.09%.

KLOE ha inoltre misurato il rapporto $R(\eta\eta')$ delle frazioni di decadimento del mesone ϕ in $\eta'\gamma$ e $\eta\gamma$, ottenendo $(4,77 \pm 0,09 \pm 0,19) \cdot 10^{-3}$, ref. 45, usando una statistica circa 20 volte piú grande della precedente misura di KLOE, ref. 46. $R(\eta\eta')$ è sensibile al contenuto di s-anti s dell' η e permette di ottenere l'angolo di mescolamento dei mesoni pseudoscalari, ϕ_P , necessario per la descrizione del fenomeno nella teoria delle perturbazioni chirali, ref. 47. Dal valore di $R(\eta\eta')$ KLOE trova $\phi_P = (41,4 \pm 0,3 \pm 0,7 \pm 0,6)^\circ$. Combinando il valore di $R(\eta\eta')$ con alte informazioni è possibile stimare la frazione $|Z_G(\eta')|^2$ di "glue" presente nell' η' . KLOE trova $|Z_G(\eta')|^2 = 0,14 \pm 0,04$.

La sezione d'urto adronica e l'anomalia magnetica del muone

L'equazione di Dirac dimostra che il rapporto giromagnetico $g = (\text{momento magnetico}) / (\text{spin})$ è due, per particelle puntiformi, cariche e con $\text{spin} = 1/2$, fatto già noto in fisica. Introducendo l'anomalia magnetica $a = (g-2)/2$, segue che $a=0$ per una particella di Dirac.

Nel 1947 Kusch e Foley osservarono con misure dirette che l'anomalia non è nulla: $a = 0,00114 \pm 0,00001$. Come già notato l'anomalia dell'elettrone è la quantità piú precisa misurata in fisica, $a(e) = 0,0011596521859 \pm 0,0000000000038$, in accordo col valore calcolato dalla elettrodinamica quantistica. Le misure di g e del Lamb shift, ambedue eseguite alla Columbia University nel 1947, e riconosciute col premio Nobel nel 1955 furono motivo e conferma della teoria dei campi.

La situazione è diversa per il muone. L'esperimento di Brookhaven trova $a(\mu) = 0,00116592080(63)$, ref. 48, che supera di $0,00000000276(81)$ il valore calcolato. Quest'ultimo tuttavia non è un risultato puramente teorico in quanto i contributi adronici all'anomalia non sono calcolabili. La modifica della funzione spettrale del fotone viene calcolata con relazioni di dispersione dalla conoscenza della sezione d'urto per $e^+e^- \rightarrow \text{adroni}$ in funzione dell'energia W , risultando in contributo ad $a(\mu)$ di circa $700 \cdot 10^{-10}$, di cui $500 \cdot 10^{-10}$ è dovuta al processo $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ nell'intervallo soglia $< W < 1000$ MeV, ref. 49.

La misura di $\sigma(e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-)$ è parte del programma di KLOE. Siccome DAΦNE funziona ad energia fissa, KLOE sceglie eventi in cui elettrone o positrone emettono un fotone prima di annichilarsi in una coppia di pioni (radiazione nello stato iniziale), misurando quindi la sezione d'urto per $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma$ dalla quale si ricava $\sigma(e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-)$, vedi ref. 50. Mentre dal punto di vista della statistica KLOE ha ottenuto risultati di altissima precisione, il passaggio da $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma$ a $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ richiede calcoli di elettrodinamica quantistica molto complicati, includendo il fatto che il fotone che accompagna i pioni potrebbe essere emesso dai pioni stessi (radiazione nello stato finale) e tutte le correzioni radiative che distorcono la misura, vedi ref. 51. I risultati di KLOE sono inclusi nel calcolo di $a(\mu)$ citato sopra. Al momento esiste quindi una discrepanza tra teoria ed esperimento del valore di $3,4\sigma$. Questa discrepanza potrebbe essere considerata un segnale di nuova fisica, per esempio l'esistenza di neutralini, smuoni, chargini e sneutrini.

Data l'importanza della possibilità di aprire nuove strade oltre il modello standard, KLOE sta attualmente lavorando su altri metodi di analisi che riducono la dipendenza su complicati calcoli, per esempio misurando il rapporto delle sezioni d'urto per $\pi^+\pi^-\gamma$ e $\mu^+\mu^-\gamma$ come pure lo studio delle stesse reazioni ad energia sotto la soglia per produzione di mesoni ϕ per ridurre la possibilità di fondi dai decadimenti del mesone ϕ .

I mesoni scalari

Da più di 40 anni conosciamo l'esistenza di mesoni leggeri, $M < 1000$ MeV, con numeri quantici $J^{PC} = 1^{+-}$, la cui natura non è tuttavia chiara. Nell'ambito del modello a quark non c'è una spiegazione convincente. Tra i vari modelli proposti, i mesoni f_0 e a_0 potrebbero essere stati di quattro quark, d-anti d-s-anti s o d-anti s-anti d-

o addirittura molecole K - anti K. KLOE ha raccolto grandi campioni di questi stati nei decadimenti radiativi del mesone ϕ ed eseguito studi delle distribuzioni di massa, vedi ref. 52, 53, 54, 55. La comprensione di questi stati rimane ancora oscura ed è quindi prematuro discutere in questa occasione i risultati finora ottenuti.

Conclusioni

Nonostante il limitato successo di DAΦNE il contributo scientifico di KLOE alla fisica delle particelle elementari negli anni 2002-2008 è stato di grandissima importanza. Lo studio dei decadimenti dei mesoni K ha dimostrato l'unitarietà della matrice di CKM con accuratezza migliore dell'uno per mille e l'universalità degli accoppiamenti di leptoni e quark. Nuovi valori di masse e vite medie sono stati ottenuti. Lo studio dell' η ha raggiunto nuovi livelli di precisione. KLOE ha fatto la misura migliore della sezione d'urto adronica ed ha raccolto i campioni più grandi di mesoni scalari. Questo esperimento ha portato, per la prima volta, un progetto scientifico interamente "made in Italy" e i LNF ad una posizione di leadership internazionale nella fisica delle particelle elementari.

Ringraziamenti

Voglio ringraziare l'aiuto di Juliet Lee-Franzini nella scrittura di questo rapporto e nell'ottenere i risultati descritti. Sono grato inoltre a Sergio Bertolucci e a Enzo Iarocci per il loro continuo supporto in tutti questi anni. A Pantaleo Raimondi KLOE deve l'ultimo femtobarn inverso. Il lavoro qui descritto è quello dei giovani di KLOE che sono cresciuti con KLOE, cimentandosi con problemi difficili, in condizioni estremamente difficili e che, senza perdersi d'animo, hanno saputo superare ogni challenge.

Bibliografia

1. "Proposal for a Phi-Factory", The Accelerator Division, LNF-90/031(R), April 1990. DAFNE design criteria, S. Bartalucci, M. Bassetti, M.E. Biagini, C. Biscari, S. Guiducci, M.R. Masullo, L. Palumbo, B. Spa-

- taro, G. Vignola, DAFNE technical note no. G-2, Nov. 12, 1990. Vedi anche G. Vignola, DAFNE 1991 Workshop, Frascati, LNF-91/037 (R). <http://www.lnf.infn.it/acceleratori>
2. S. Abachi et al., (DØ Collaboration), Phys. Rev. Lett. 74 (1995) 2632.
 3. The KLOE Collaboration, The KLOE Detector, LNF-93/002 (IR), 1993.
 4. M. Adinolfi et al., (KLOE Collab.), Nucl. Instrum. Meth. A 488 (2002) 51.
 5. M. Adinolfi et al., (KLOE Collab.), Nucl. Instrum. Meth. A 482 (2002) 364.
 10. F. Ambrosino et al., (KLOE Collab.), JHEP 12 (2007) 073.
 11. W.-M. Yao et al., (Particle Data Group), J. Phys. G 33 (2006) 1.
 12. F. Ambrosino et al., (KLOE Collab.), Phys. Lett. B 626 (2005) 15.
 13. K.G. Vosburgh et al, Phys. Rev. D 6 (1972) 1834.
 14. F. Ambrosino et al., (KLOE Collab.), JHEP 01 (2008) 073
 15. F. Ambrosino et al., (KLOE Collab.), Phys. Lett. B 608 (2005) 199
 16. F. Ambrosino et al., (KLOE Collab.), Phys. Lett. B 642 (2006) 315.
 17. H. Christenson, J. W. Cronin, V. L. Fitch, and R. Turlay, Phys. Rev. Lett., 13 (1964) 138.
 18. N. Cabibbo, Phys. Rev. Lett. 10 (1963) 531.
 19. M. Kobayashi, T. Maskawa, Prog. Theor. Phys. 652 (1973) 49.
 20. The CUSB experiment found as early as 1983 that $|V_{ub}|^2 < 4 \cdot 10^{-5}$, vedi C. Klopfenstein et al. (CUSB Collaboration), Phys. Lett. B 130 (1984) 444.
 21. A. Aloisio et al., (KLOE Collab.), Phys. Lett. B 537 (2002) 21; F. Ambrosino et al. (KLOE Collab.), Eur. Phys. J. C 48 (2006) 767.
 22. F. Ambrosino et al. (KLOE Coll.), Phys. Lett. B 535 (2002) 37; *ibid*, 636 (2006) 173.
 23. F. Ambrosino et al. (KLOE Collab.), Phys. Lett. B 619 (2005) 61.
 24. F. Ambrosino et al., (KLOE Collab.), Phys. Lett. B 632 (2006) 43.
 25. F. Ambrosino et al., (KLOE Collab.), Phys. Lett. B 562 (2004) 61.
 26. F. Ambrosino et al., (KLOE Collab.), Phys. Lett. B 638 (2006) 140.
 27. F. Ambrosino et al., (KLOE Collab.), Phys. Lett. B 632 (2006) 76.
 28. F. Ambrosino et al., (KLOE Collab.), JHEP 02 (2008) 098.
 29. F. Ambrosino et al., (KLOE Collab.), Phys. Lett. B 636 (2006) 166.
 30. F. Ambrosino et al., (KLOE Collab.), JHEP 12 (2007) 105.
 31. M. Ademollo R. Gatto, Phys. Rev. Lett. 13 (1964) 264.
 32. A. Sirlin, Rev. Mod. Phys. 573 (1978) 50; Nucl. Phys. B 83 (1982) 196; H. Leutwyler, M. Roos, Zeit. Phys. C 91 (1984) 25; V. Cirigliano et al. Eur. Phys. J. C 21 (2002) 23; W.J. Marciano and A. Sirlin, Phys. Rev. Lett. 96 (2006) 032002; P.A. Boyle et al., (RBC/UKQCD Collaboration), arXiv:0710.5136.
 33. I.S. Towner and J.C. Hardy, arXiv:0710.3181.
 34. C.T.H. Davies, et al. Phys. Rev. Lett. 92 (2004) 022001; E. Follana et al., (HPQCD/UKQCD Collaboration), arXiv:0706.1726.
 35. W.J. Marciano, Phys. Rev. Lett. 93 (2004) 231803.
 36. F. Ambrosino et al., (KLOE Collab.), JHEP 04 (2008) 059.
 37. S. Eidelman et al., (Particle Data Group), Phys. Lett. B 592 (2004) 1.
 38. G. Lüders, Annals Phys. 2 (1957) 1 [Annals Phys. 281 (2000) 1004].
 39. F. Ambrosino et al., (KLOE Collab.), Phys. Lett. B 638 (2006) 140.
 40. F. Ambrosino et al., (KLOE Collab.), JHEP 12 (2006) 011.
 41. A. Aloisio et al., (KLOE Collab.), Phys. Lett. B 591 (2004) 49.
 42. F. Ambrosino et al., (KLOE Collab.), Phys. Lett. B 606 (2005) 276.
 43. F. Ambrosino et al., (KLOE Collab.), arXiv:0707.4137.
 44. F. Ambrosino et al., (KLOE Collab.), JHEP 05 (2008) 006.
 45. A. Aloisio et al., (KLOE Collab.), Phys. Lett. B 648 (2007) 45.
 46. A. Aloisio et al., (KLOE Collab.), Phys. Lett. B 541 (2002) 45.

47. Th. Feldmann, *Int. J. Mod. Phys. A* 159 (2000) 15.
48. G. W. Bennett et al. (Muon $g - 2$ Collaboration), *Phys. Rev. D* 73 (2006) 072003.
49. K. Hagiwara, et al., *Phys. Lett. B* 649 (2007) 173.
50. A. Aloisio et al., (KLOE Collab.), *Phys. Lett. B* 606 (2005) 12.
51. G. Rodrigo et al., *Eur. Phys. J. C* 24 (2002) 71; H. Czy? et al., *ibid*, 39 (2005) 411.
52. A. Aloisio et al., (KLOE Collab.), *Phys. Lett. B* 537 (2002) 21.
53. A. Aloisio et al., (KLOE Collab.), *Phys. Lett. B* 536 (2002) 209.
54. F. Ambrosino et al., (KLOE Collab.), arXiv:hep-ex/0609009, *Eur. Phys. J. C* 49 (2007) 473.
55. F. Ambrosino et al., (KLOE Collab.), *Phys. Lett. B* 634 (2006) 148.

PAOLO FRANZINI

Contatti

Dipartimento di Fisica, Università di Roma e Sezione INFN

E-mail: paolo.franzini@lnf.infn.it

Roma, Italy