

AperTO - Archivio Istituzionale Open Access dell'Università di Torino

L' esperimento FINUDA a DAPHNE

This is the author's manuscript

Original Citation:

Availability:

This version is available <http://hdl.handle.net/2318/21458> since

Terms of use:

Open Access

Anyone can freely access the full text of works made available as "Open Access". Works made available under a Creative Commons license can be used according to the terms and conditions of said license. Use of all other works requires consent of the right holder (author or publisher) if not exempted from copyright protection by the applicable law.

(Article begins on next page)

SCIENZA IN PRIMO PIANO

L'ESPERIMENTO FINUDA a DAΦNE

E. Botta e T. Bressani

*Dipartimento di Fisica Sperimentale,
Università di Torino e INFN, Sezione di Torino*

E. M. Fiore

*Dipartimento di Fisica, Università di Bari
e INFN, Sezione di Bari*

O. Morra

*CNR-ISFI Sezione di Torino
e INFN Sezione di Torino*

1. – Introduzione

L'interesse scientifico per le tematiche della Fisica degli *ipernuclei* ⁽¹⁾, unito all'opportunità rappresentata dalla costruzione di un nuovo *collider* di elettroni e positroni in Italia, DAΦNE, ha spinto parte della comunità italiana dei fisici delle energie intermedie ad elaborare il progetto di un esperimento dedicato alla fisica degli *ipernuclei*, l'esperimento FINUDA, che ora è pronto ad iniziare la fase sperimentale. L'esperimento opererà in una delle due regioni di interazione di DAΦNE, presso i Laboratori Nazionali di Frascati dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare. La Collaborazione FINUDA consiste di circa 40 ricercatori e 15 tecnici appartenenti alle Università e Sezioni INFN di Bari, Brescia, Laboratori Nazionali di Frascati, Pavia, Torino e Trieste, con l'aggiunta di alcuni ricercatori stranieri appartenenti al Laboratorio TRIUMF (Canada) e all'Università di Teheran (Iran).

2. – La macchina DAΦNE

DAΦNE ⁽²⁾ è una “Φ-factory”, in cui elettroni di 510 MeV di energia cinetica vengono fatti interagire con positroni della stessa energia in urti pressochè frontali (l'angolo tra le due particelle è

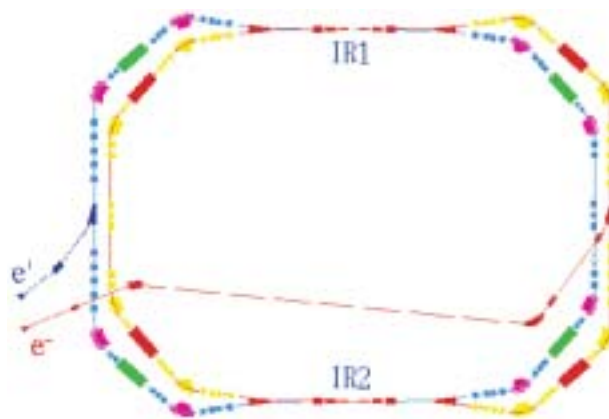


Fig. 1. – Struttura del doppio anello del collider (e⁺, e⁺) DAΦNE.

[$\pi - 0.013$] rad), in modo che l'energia totale disponibile per la reazione, nel sistema di riferimento del centro di massa, risulti pari alla massa a riposo del mesone Φ ($M = 1019.417 \pm 0.014 \text{ MeV}/c^2$, $\Gamma = 4.458 \pm 0.032 \text{ MeV}/c^2$). Nella fig. 1 è possibile vedere la struttura della macchina. Elettroni e positroni circolano all'interno di due anelli separati che si intersecano in due punti, le regioni di interazione IR1 ed IR2, dove viene prodotta la Φ ; attorno a queste due regioni vengono collocati gli apparati sperimentali.

Il *collider* fa parte di un sistema più complesso di acceleratori, illustrato in fig. 2, che comprende, oltre al doppio anello, il sistema di iniezione costituito da un acceleratore lineare (LINAC) diviso in due sezioni e da un anello di accumulazione. Il sistema di iniezione è preceduto da una sezione di pre-iniezione consistente in un catodo, che fornisce elettroni, seguito da una griglia per la formazione di pacchetti (*bunch*) di particelle, e da un anodo ad alta tensione per una accelerazione preliminare. Gli elettroni così prodotti entrano nella prima sezione del LINAC, dove subiscono una prima accelerazione fino a circa 270 MeV. I positroni vengono prodotti dalla radiazione di frenamento

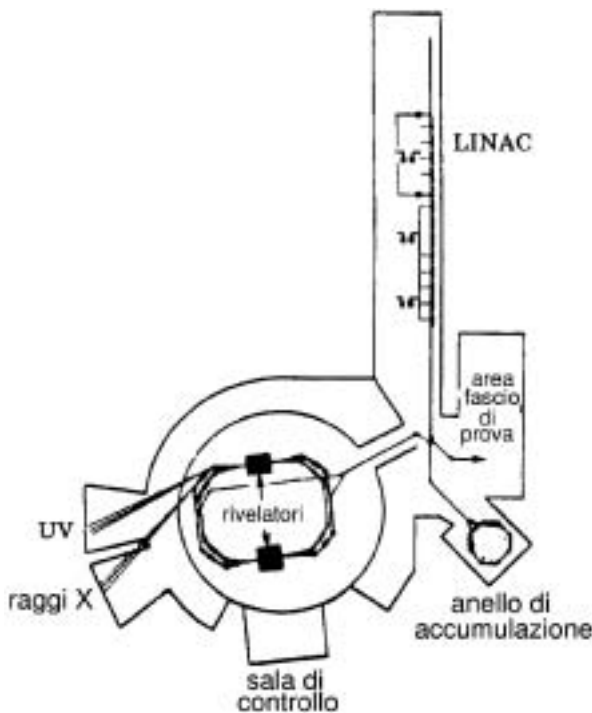


Fig. 2. – Vista generale del complesso degli acceleratori di DAΦNE.

emessa dagli elettroni dentro bersagli ad elevato numero atomico (W) che vengono inseriti, con opportune sequenze temporali, all’uscita della prima sezione del LINAC. Le particelle cariche, e^+ o e^- a seconda del ciclo di operazione scelto, entrano nella seconda sezione del LINAC dove vengono accelerate fino a raggiungere una energia lievemente maggiore di quella nominale dei fasci. Tra il LINAC e il doppio anello è posto un piccolo anello di accumulazione, che opera all’energia nominale dei fasci, il quale consente di adattare la frequenza con cui i pacchetti di particelle escono dal LINAC a quella di operazione del doppio anello e di disaccoppiare i due sistemi permettendo di iniettare nella macchina principale fasci con una dispersione energetica molto più contenuta di quella che essi posseggono all’uscita della sezione dei LINAC.

Il mesone Φ decade con vita media $\tau \simeq 10^{-22}$ s producendo per lo più mesoni K, secondo i ratei riportati nella tabella I. Una Φ -factory può essere, pertanto, considerata come una sorgente di mesoni K carichi e neutri, di bassa energia, monocromatici (*quasi* monocromatici per esattezza, a causa della larghezza Γ del mesone Φ), collineari (i K vengono emessi a 180° se la Φ decade a riposo) e con la possibilità di essere facilmente identificati sfruttando queste ca-

Tabella I. – Modi di decadimento del mesone Φ .

Canale	Frequenza (%)	Impulso (MeV/c)	Energia cinetica (MeV/c)
K^+K^-	~ 49.5	127	16.1
$K_S^0 K_L^0$	~ 34.4	110	15.9
$\rho\pi$	~ 12.9	183	
$\gamma\eta$	~ 1.28	363	
altri	~ 2		

ratteristiche. I kaoni neutri a DAΦNE vengono “usati” dall’esperimento KLOE per studiare la violazione di CP e CPT nei decadimenti rari del K_L^0 ; i kaoni carichi (K^- per essere più esatti), invece, vengono “usati”, oltre che dall’esperimento FINUDA per la produzione di *iper nuclei*, dall’esperimento DEAR, dedicato alla misura della lunghezza di scattering dell’interazione $K-N$.

Una proprietà specifica di un acceleratore è la *luminosità* (\mathcal{L}) che è proporzionale al numero n di interazioni prodotte per unità di tempo attraverso la sezione d’urto σ del processo considerato: $n = \mathcal{L} \sigma$. Nel caso di un collider e^+e^- la luminosità può essere espressa nel modo seguente:

$$\mathcal{L} = N\mathcal{L}_0 = Nf \frac{n_1 n_2}{4\pi\sigma_x\sigma_y}, \quad (1)$$

dove \mathcal{L}_0 è la cosiddetta luminosità del singolo *bunch*, N è il numero totale di *bunch*, n_1 ed n_2 sono i numeri di e^+ e e^- per *bunch* rispettivamente, f è la frequenza di rivoluzione e σ_x e σ_y sono le dimensioni r.m.s. orizzontali e verticali dei *bunch* nel punto di interazione. DAΦNE è stato progettato in modo da avere una elevata lumino-

Tabella II. – Parametri di progetto dell’acceleratore DAΦNE.

Energia di ogni fascio	510 MeV
Luminosità massima	$5 \cdot 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
Lunghezza di ciascun anello	94.56 m
Dimensione orizzontale del fascio nel punto di interazione	2.11 mm r.m.s.
Dimensione verticale del fascio nel punto di interazione	0.021 mm r.m.s.
Dimensione longitudinale della regione di interazione	35 mm r.m.s.
Lunghezza del <i>bunch</i>	30 mm
Angolo di incidenza nel punto di interazione	13 mrad
Frequenza di collisione	fino a 368.25 MHz
Numero di <i>bunch</i> per anello	fino a 120
Numero di particelle per <i>bunch</i>	$8.9 \cdot 10^{10}$
Corrente massima per anello	5.2 A

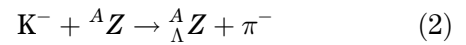
sità ($\mathcal{L} > 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$) grazie ad una elevata frequenza di collisione Nf , ottenuta immagazzinando in ciascuno dei due anelli un elevato numero di *bunch* a piccola distanza uno dall'altro ($\sim 80 \text{ cm}$). La tabella II riassume i parametri del collider legati alla luminosità. Con una luminosità $\mathcal{L} = 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, assumendo come valore della sezione d'urto e^+e^- al picco della Φ : $\sigma_{\text{peak}} \sim 4.4 \cdot 10^{-30} \text{ cm}^2$, in un anno di operazione ($\sim 10^7 \text{ s}$) DAΦNE produrrà $\sim 4.4 \cdot 10^9 \Phi$, $\sim 2.2 \cdot 10^9$ coppie K^+K^- e $\sim 1.6 \cdot 10^9$ coppie $K_L K_S$.

La fase di “rodaggio” dell'acceleratore, durante la quale esso ha operato in assenza dei magneti degli esperimenti, è terminata nel novembre 1998, con una luminosità di singolo *bunch* $\mathcal{L}_0 = 1.1 \cdot 10^{30} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Attualmente, la luminosità è di $\mathcal{L} = 5.3 \cdot 10^{31} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ($n_1 = 47$ ed $n_2 = 47$), con il magnete dell'esperimento KLOE attivo. A causa della bassa energia dei fasci, l'inserimento di magneti “esterni alla macchina” comporta l'attuazione di sistemi di compensazione, particolarmente delicati e difficili da calibrare, per limitare le inevitabili instabilità di fascio che limitano di fatto il numero di particelle che riescono a percorrere orbite stazionarie all'interno degli anelli. La continuazione del lavoro di *fine tuning* della macchina, attualmente in corso e che è stata molto produttiva finora, permetterà in tempi brevi di raggiungere valori di luminosità, con i magneti degli esperimenti attivi, consistenti con quelli di progetto.

3. – L'esperimento FINUDA

Potrebbe sembrare curioso che un esperimento di fisica (iper-) nucleare venga effettuato ad un *collider*: le misure di fisica nucleare, tipicamente, vengono svolte usando fasci estratti, mentre i *collider* forniscono condizioni di lavoro più adatte per esperimenti di fisica delle particelle. FINUDA, invece, è stato progettato appositamente per lavorare ad una delle zone di interazione di DAΦNE per sfruttare le proprietà dei K^- prodotti dal decadimento della Φ , ed in particolare il fatto che essi posseggano una energia cinetica molto bassa ($\sim 16 \text{ MeV}$) e possano, pertanto, essere fermati in bersagli molto sottili, permettendo di effettuare misure di spettroscopia ad alta risoluzione.

Il vantaggio di usare K^- a riposo per produrre *ipernuclei* con la reazione



appare evidente se si confrontano le caratteristiche delle diverse tecniche di produzione. Quando si usano fasci di K^- o di π^+ in volo per produrre *ipernuclei*⁽¹⁾ è necessario utilizzare dei bersagli di spessore x notevole, corrispondente ad un valore del prodotto ρx dell'ordine di qualche g/cm^2 , dove ρ è la densità del bersaglio espressa in g/cm^3 , a causa dei piccoli valori delle sezioni d'urto. Lo spessore del bersaglio limita la risoluzione sulla misura dell'impulso del mesone prodotto a causa dell'incertezza sulla posizione del vertice di interazione e delle fluttuazioni sulla direzione e sulla quantità di energia perduta dalla particella prima di uscire dal bersaglio. In questo caso la risoluzione in energia degli spettri misurati è dominata da tali effetti e non dalla risoluzione strumentale, $\Delta p/p$, dello spettrometro magnetico utilizzato, tipicamente inferiore a 10^{-3} . Inoltre l'angolo solido dello spettrometro è generalmente limitato, $\sim 100 \text{ msr}$, e, di conseguenza, anche l'accettanza per la rivelazione dei prodotti carichi del decadimento è ridotta. Si presentano problemi analoghi negli esperimenti con K^- a riposo effettuati a macchine a protoni, dove vengono prodotti flussi intensi di kaoni estraendo i protoni di alta energia e facendoli incidere su bersagli nucleari. La distanza tra la sorgente dei K e la zona sperimentale deve essere di almeno 10–15 m, per motivi di radioprotezione, e ad una tale distanza solo fasci di K^\pm di impulso maggiore a $\sim 500 \text{ MeV}/c$ riescono a sopravvivere con intensità sufficiente ($\sim 2\%$ del fascio iniziale). Pertanto esperimenti con K^- a riposo vanno effettuati rallentando fasci di kaoni di 500–600 MeV/c con dei moderatori posti davanti al bersaglio nucleare; i moderatori devono avere spessori notevoli ed introducono, dunque, di nuovo degli errori sulla misura dell'impulso delle particelle emesse a causa dell'incertezza sulla posizione del vertice.

I K^- prodotti a DAΦNE, invece, possono essere portati a riposo in spessori di materia $< 100 \mu\text{m}$; pertanto si possono usare dei bersagli nucleari sottili ($\sim 300 \text{ mg/cm}^2$) per fermare i kaoni in punti prossimi alla superficie di uscita, così che i π^- prodotti attraversino quantità di materiale molto piccole e subiscano una degradazione in impulso molto contenuta. In tale caso la precisione sulla misura del loro impulso, e di conseguenza sull'energia degli stati ipernucleari prodotti, resta determinata preva-

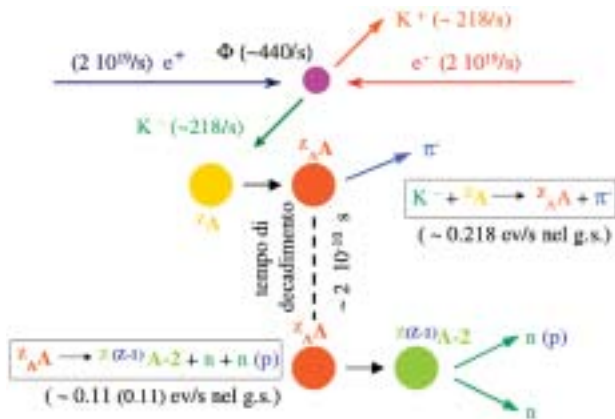


Fig. 3. – Schema della successione di reazioni che costituiscono un tipico evento per l’esperimento FINUDA.

lentamente dalla risoluzione sperimentale dello spettrometro. L’angolo solido che può essere coperto da FINUDA, poi, risulta notevole e fornisce una buona accettazione anche per la rivelazione dei prodotti del decadimento non mesonico degli ipernuclei.

La fig. 3 rappresenta in maniera schematica la successione di reazioni che costituiscono un evento ipernucleare “completo” cioè un evento di segnale tipico per l’esperimento FINUDA. A $\mathcal{L} = 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ vengono prodotti $\sim 440 \Phi/s$; dal decadimento della Φ , ricordando la tabella I, si ottengono 218 K^-/s ; il K^- rallentato interagisce con un neutrone del nucleo Z_A per formare un ipernucleo, il quale viene prodotto nel suo stato fondamentale con una probabilità di $\sim 10^{-3}$ per K^- arrestato⁽³⁾, e questo, infine, “decade” emettendo due neutroni (o un neutrone ed un protone) dopo una vita media dell’ordine di $2 \cdot 10^{-10} \text{ s}$.

3.1. – Apparato sperimentale

FINUDA⁽⁴⁾ è uno spettrometro magnetico ad alta risoluzione costruito a simmetria cilindrica attorno alla direzione dei fasci e^+ ed e^- che si intersecano nella zona di interazione IR2 indicata in fig. 1. Esso è stato ottimizzato in modo da avere una grande accettazione angolare, la migliore risoluzione possibile sulla misura dell’impulso ed anche per avere buone capacità di selezione degli eventi di segnale rispetto al fondo (*trigger*).

La fig. 4 mostra la disposizione dei rivelatori attorno alla regione di intersezione dei fasci. Subito attorno al tubo a vuoto della linea di fa-

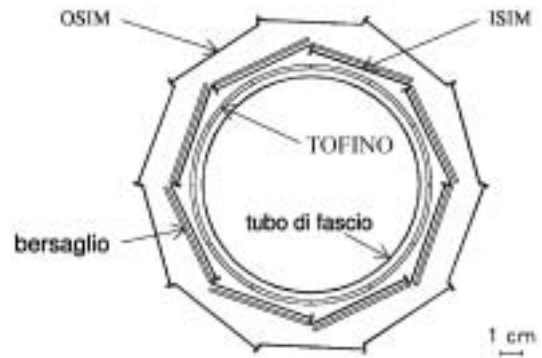


Fig. 4. – Rappresentazione schematica della disposizione dei rivelatori dell’apparato FINUDA attorno alla zona di intersezione di DAΦNE.

scio, realizzato in Be con uno spessore di 400 μm in modo da permettere la trasmissione dei K di basso impulso con una perdita di energia di soli 3 MeV, si trova un “barilotto” di 12 scintillatori plastici (NE102A), di dimensioni $200 \times 31 \times 2.3 \text{ mm}^3$ ciascuno, letti ai due estremi con dei fotodiodi ibridi (HPD), chiamato TOFINO⁽⁵⁾. Esso rivela le coppie K^+K^- , altamente ionizzanti, che provengono dalla zona di intersezione e fornisce un valido strumento per selezionare gli eventi di interesse. Le coppie K^+K^- presentano una distribuzione angolare che varia come $\sin^2 \theta$, dove θ rappresenta l’angolo rispetto all’asse dei fasci e^+e^- , scelto come asse z nel sistema di riferimento dell’apparato.

La posizione del K^- immediatamente prima del sottile bersaglio nucleare (uno spessore tipico è 1.3 mm per il ${}^{12}\text{C}$) viene misurata, con una risoluzione spaziale $\sigma \sim 30\text{--}50 \mu\text{m}$, da un sistema ottagonale di rivelatori a *microstrip* al silicio, di spessore 300 μm , ISIM⁽⁶⁾, il quale fornisce anche una identificazione delle particelle attraverso la misura della perdita di energia. I bersagli, specie nucleari solide (${}^7\text{Li}$, ${}^{12}\text{C}$, ${}^{27}\text{Al}$, ${}^{28}\text{Si}$, ${}^{51}\text{V}$, ${}^{89}\text{Y}$, ...) lavorate in fogli sottili, vengono posti a ridosso di ISIM sfruttando il supporto meccanico di quest’ultimo.

Nella fig. 5 è riportata una vista tridimensionale dell’intero apparato.

La regione di interazione di FINUDA è circondata da un grande spettrometro magnetico, formato da quattro strati di rivelatori immersi nel campo magnetico uniforme di 1.1 T prodotto da un solenoide superconduttore. L’avvolgimento superconduttore ha un diametro interno di 1460 mm ed una lunghezza di 2112 mm; il cavo superconduttore è di una lega NbTi/Cu, stabilizzata con Al ed isolata da un nastro di fibra di vetro secco

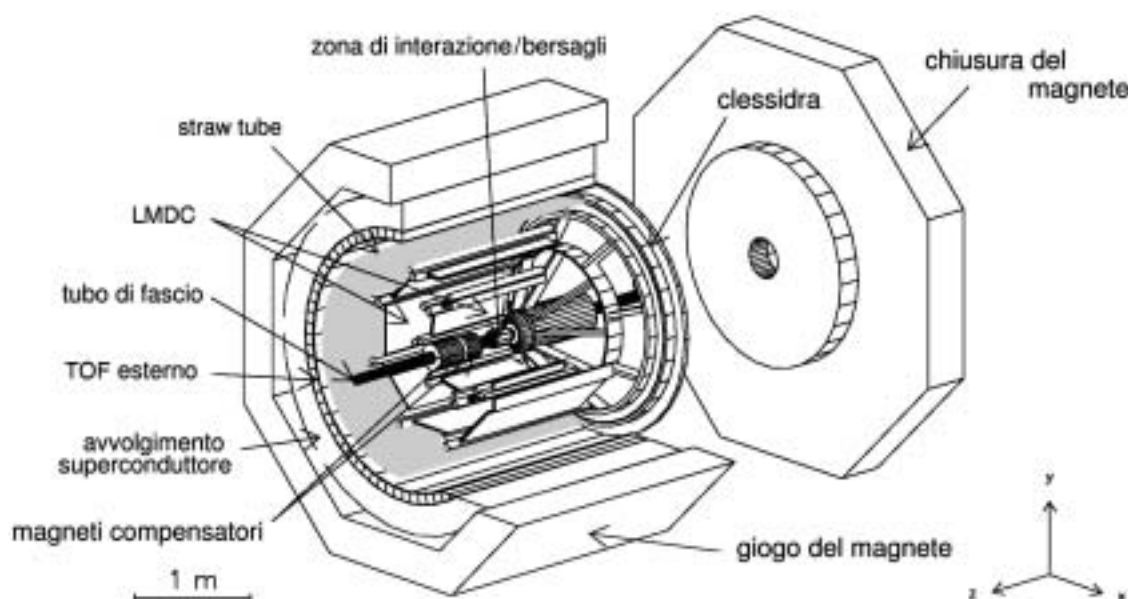


Fig. 5. - Vista di insieme dell'apparato FINUDA con il magnete superconduttore ed il traferro.

per un totale di 764 spire. L'avvolgimento è stato fatto su due strati per ottimizzare l'omogeneità del campo magnetico e ridurre il consumo di He liquido, che viene usato per raffreddare il cavo ad una temperatura alla quale questo si comporta come un superconduttore. La densità della corrente circolante è di circa 2850 A/cm^2 nella zona centrale e di circa 4021 A/cm^2 agli estremi dell'avvolgimento per ridurre gli effetti di bordo. L'avvolgimento è circondato da un traferro a forma ottagonale (giogo del magnete in figura) e con uno spessore di circa 400 mm; ai due estremi le linee di campo vengono convogliate entro due "tappi" (chiusura del magnete in figura) opportunamente modellati e con un buco centrale per il passaggio del tubo di fascio. La distribuzione del campo magnetico, misurata sperimentalmente, mostra una omogeneità migliore del 1% praticamente in tutto il volume utile per l'esperimento, occupato dal cosiddetto tracciatore.

I quattro strati di rivelatori che permettono di effettuare il tracciamento delle particelle cariche (π^- della formazione dell'*ipernucleo*, protoni del decadimento non mesonico dell'*ipernucleo*, μ^+ dal decadimento del K^+) che fuoriescono dai bersagli sono:

- un sistema decagonale di *microstrip* al silicio (OSIM), con le stesse caratteristiche dei moduli che compongono ISIM;
- due strati di camere a deriva planari (LMDC) (⁷), con un solo piano di fili di sense, operanti con una miscela $\text{He-C}_4\text{H}_{10}$ (70%-30%) e con pareti di mylar

di spessore ridotto ($36 \mu\text{m}$ in totale per ogni camera); esse sono in grado di misurare il punto di passaggio delle particelle cariche, nel piano ortogonale all'asse dei fasci con una risoluzione $< 140 \mu\text{m}$ rms, e nella direzione dei fasci con una risoluzione $< 1 \text{ cm}$ rms, grazie alla tecnica della partizione di carica;

- un sistema di 2424 tubi a *straw* (contatori gassosi operanti in regime di leggera scarica) a sezione circolare con diametro di 15 mm, ST, formato da un doppio strato di tubi longitudinali (lungo l'asse dei fasci) e due doppi strati di tubi stereo, inclinati di circa $\pm 13^\circ$ rispetto all'asse dei fasci. Essi operano con una miscela $\text{Ar-C}_2\text{H}_6$ (50%-50%) e sono in grado di fornire una buona risoluzione spaziale ($\sim 100 \mu\text{m}$ rms) nel piano perpendicolare all'asse dei fasci, in quanto non risentono dell'effetto dell'angolo di incidenza della particella, ed una risoluzione $\sim 500 \mu\text{m}$ rms lungo l'asse dei fasci (⁸).

In fig. 6 è riportata una vista frontale dell'apparato sperimentale durante la fase di montaggio; si possono riconoscere le camere a deriva, con la caratteristica disposizione ottagonale.

Il volume di tracciamento ($\sim 8 \text{ m}^3$) dello spettrometro è immerso in atmosfera di He al fine di minimizzare l'effetto dello *scattering* multiplo coulombiano, che è il fattore che limita di fatto la risoluzione dello spettrometro. La realizzazione della camera ad elio, che contiene una parte consistente dei rivelatori e della meccanica di supporto, ha comportato un grandissimo sforzo



Fig. 6. – Vista frontale dell'apparato sperimentale FINUDA durante la fase di installazione dei rivelatori: sono presenti gli scintillatori esterni, i tubi a straw e le camere a deriva.

tecnologico. La geometria dell'apparato, la posizione dei rivelatori ed il valore del campo magnetico sono stati ottimizzati in modo da massimizzare l'accettanza e la risoluzione sulla misura dell'impulso per i π^- di produzione degli *ipernuclei*, che hanno impulsi tipici nell'intervallo 240–270 MeV/c. La risoluzione in impulso dell'apparato è la sua caratteristica cruciale; infatti la risoluzione dell'impulso del π^- è direttamente legata alla risoluzione sull'energia dei livelli ipernucleari. Indicando con M_{Hyp} , M_A , M_K , M_π e T_π rispettivamente la massa dell'*ipernucleo* nello stato in cui viene formato, la massa del nucleo bersaglio, del K, del π e l'energia cinetica di quest'ultimo, il bilancio energetico della reazione (2) può essere espresso come

$$M_{\text{Hyp}} = M_A + M_K - M_\pi - T_\pi, \quad (3)$$

ove si è trascurata l'energia cinetica dell'*ipernucleo* formato; ne segue che $\Delta M_{\text{Hyp}} = \Delta T_\pi$ e

$$\frac{\Delta T_\pi}{T_\pi} = \frac{\sqrt{p_\pi^2 + m_\pi^2} + m_\pi}{\sqrt{p_\pi^2 + m_\pi^2}} \frac{\Delta p_\pi}{p_\pi}. \quad (4)$$

Per un π^- con impulso di 270 MeV/c una incertezza dello 0.1% sulla misura dell'impulso corrisponde ad una risoluzione in energia di 240 keV sul corrispondente livello ipernucleare. Dato che FINUDA si propone di effettuare misure di spettroscopia con una risoluzione di ~ 700 keV FWHM, la risoluzione in impulso necessaria è dello 0.3%. Al fine di ottenere tale risoluzione, particolare cura è stata

posta per minimizzare la quantità di materia lungo il cammino dei π^- , costruendo un tracciatore “trasparente” con una lunghezza di radiazione che risulta dell'ordine di $1,7 \cdot 10^5$ cm, cinque volte superiore ai $3,4 \cdot 10^4$ cm di un pari volume di aria.

Una valutazione della risoluzione in impulso dei π^- con formule classiche⁽⁹⁾ indica che le prestazioni richieste sono ampiamente soddisfatte dall'apparato. Simulazioni Monte Carlo di popolazioni di tracce di particelle differenti uscenti dai bersagli hanno fornito risoluzioni del 0.28% per i π^- da 270 MeV/c e 0.79% per protoni da 415 MeV/c tipici del decadimento non mesonico. Lo spessore ridotto dei bersagli permette, dunque, di sfruttare appieno la risoluzione dello spettrometro; non di meno, si può applicare una correzione sull'impulso dei π^- per tenere conto dell'energia persa nel bersaglio, dato che sia il vertice di formazione dell'*ipernucleo* che il punto di uscita del π^- dal bersaglio possono essere ricostruiti con un'incertezza di ~ 200 μm rms.

Lo spettrometro è circondato da un barile di 72 scintillatori plastici (BC408, $200 \times 10 \times 10$ cm³), chiamato TOFONE⁽¹⁰⁾, che forniscono segnali logici veloci al sistema di *trigger* e permettono la rivelazione dei neutroni emessi nel decadimento non mesonico degli *ipernuclei* con una efficienza $>10\%$.

Per quanto riguarda i ratei di eventi, sono state effettuate delle simulazioni Monte Carlo nelle quali è stata riprodotta la strategia di selezione applicabile in FINUDA e l'accettanza dell'apparato. Si è ipotizzato di lavorare con una luminosità di macchina pari a $\mathcal{L} = 10^{32}$ cm⁻² s⁻¹ e si è assunto un rateo tipico di produzione di 1 *ipernucleo* nel suo stato fondamentale ogni 1000 K⁻ fermati, valore che è stato ricavato al KEK⁽³⁾ con K⁻ a riposo e bersagli di ¹²C (scintillatore). I risultati di tali simulazioni indicano che ci si può attendere di misurare circa 80 eventi/ora di formazione di *ipernuclei* nello stato fondamentale, con π^- emessi “in avanti”, cioè che non attraversano la regione di interazione prima di entrare nello spettrometro, e sono perciò rivelabili con elevata risoluzione ed utili per studi di spettroscopia. Il fondo più consistente proviene da eventi nei quali il K⁻ interagisce nel bersaglio senza formare un *ipernucleo* (produzione di Λ “quasi-free”, produzione di Σ ..) oppure il K⁺ decade in $\mu^+ \nu_\mu$: in questi casi, infatti, esiste la possibilità di ingannare la logica di *trigger* dato che viene simulato un evento di interesse; il rateo atteso per i *trigger* dovuti ad eventi di fondo è di circa 15 Hz, e

viene poi ridotto di un fattore maggiore di 10^4 in fase di analisi, con opportuni criteri di selezione.

La grande accettazione angolare dell'apparato sia per i π^- che per i prodotti di decadimento permette, da un lato, di avere ratei di produzione di *ipernuclei* superiori a quelli ottenibili presso altri acceleratori (BNL, CEBAF, KEK), dall'altro di studiare con il medesimo apparato anche il decadimento dell'*ipernucleo*. Infatti, in FINUDA, si può ottenere una misura diretta della vita media degli *ipernuclei* dalla differenza tra l'istante in cui il π^- emesso all'atto della formazione colpisce il TOFONE e l'istante in cui si ha l'urto del protone emesso nella reazione di decadimento e perciò ritardato di un tempo pari alla vita media, dopo aver corretto per i diversi tempi di volo delle particelle. Bisogna sottolineare in proposito che FINUDA ha la possibilità di rivelare i nucleoni prodotti nel decadimento *in coincidenza* con il π^- di formazione, sì da poter identificare senza incertezze il sistema (iper-) nucleare di partenza se si selezionano gli eventi nei quali l'*ipernucleo* viene prodotto nel suo stato fondamentale. Grazie alla buona risoluzione temporale del sistema di tempi di volo di FINUDA (TOFINO-TOFONE), si può pensare di ricostruire la vita media di un ipernucleo con un errore statistico dell'ordine del 10% con soli circa 1000 eventi per i quali l'impulso del π^- cada nel picco dello stato fondamentale. Questo corrisponde ad un periodo di circa 7 ore di acquisizione con luminosità $\mathcal{L} = 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, nei casi più favorevoli (^{12}C).

Volendo, infine, considerare la misura dei ratei di decadimenti non mesonici indotti da protoni, Γ_p , e da neutroni, Γ_n , se si considerano le efficienze di rivelazione dei neutroni di decadimento, e si assume nuovamente di utilizzare solo gli eventi in cui l'*ipernucleo* è stato formato nel suo stato fondamentale, ci si aspetta di ottenere ~ 2 eventi/ora di decadimento non mesonico indotto da protoni e ~ 0.4 eventi/ora di decadimento non mesonico indotto da neutroni, sempre con $\mathcal{L} = 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

3.2. – Programma scientifico

Dopo aver passato in rassegna le caratteristiche e le capacità dell'apparato sperimentale, accenniamo brevemente ai punti del programma scientifico dell'esperimento, considerando anche i tempi prevedibili per il raggiungimento dei vari risultati. Bisogna al proposito ricordare che

le misure di fisica più significative sono:

- 1) la spettroscopia degli stati ipernucleari prodotti, soprattutto in *ipernuclei* medio-pesanti;
- 2) la misura della vita media della Λ negli *ipernuclei*, soprattutto medio-pesanti;
- 3) la misura delle probabilità relative di decadimento non-mesonico, in coincidenza con il π che indica la produzione dell'*ipernucleo* nello stato fondamentale;
- 4) la ricerca di eventuali decadimenti rari a due corpi in *ipernuclei* leggeri, del tipo $^4_{\Lambda}\text{He} \rightarrow \text{d} + \text{d}, \rightarrow ^3\text{H} + \text{p}$;
- 5) la ricerca di eventuali *ipernuclei* ricchi in neutroni.

Le misure 1) e 2) sono un complemento ed un raffinamento (risoluzione migliore) di esperimenti precedenti, le misure 3), 4) e 5) sono del tutto innovative.

Nel delineare un programma scientifico per FINUDA è necessario tenere in considerazione due condizionamenti sperimentali:

- 1) la scelta dei bersagli deve essere limitata a solidi metallici, lavorabili in lamine abbastanza sottili e possibilmente mono (o quasi) isotopici. Ovvi candidati sono ^6Li , ^7Li , ^9Be , ^{12}C , ^{27}Al , ^{28}Si , ^{51}V , ^{89}Y , ^{209}Bi , reperibili a prezzi accessibili. Per intraprendere misure su isotopi selezionati (quelli del Ca) sarà necessario instaurare rapporti di collaborazione con altri laboratori stranieri che già dispongono di questi bersagli.
- 2) FINUDA è un esperimento a bersaglio fisso ad un *collider* e questo pone delle limitazioni all'accessibilità dei bersagli. Un *collider* viene fatto funzionare per lunghi periodi (tipicamente un anno), salvo brevi interruzioni per manutenzione ordinaria. La struttura stessa di FINUDA, costruita attorno alla zona di interazione, fa capire che non è facile cambiare il sistema di bersagli montato vicino al fascio. Bisogna spostare il magnete, smontare una parte del tracciatore, rimontare e riallineare il tutto, insomma un lavoro che, ad essere ottimisti, richiede almeno un mese di tempo (valutando 24 ore lavorative al giorno). D'altra parte è possibile studiare contemporaneamente 8 bersagli diversi, in tutti gli aspetti di fisica enunciati in 1)-5) in quanto la determinazione del vertice di interazione del K^- identifica univocamente il bersaglio nel quale è avvenuto ogni singolo evento registrato.

Da queste considerazioni si capisce come il programma di fisica iniziale debba essere un compromesso tra la precisione statistica delle singole misure che si vuole raggiungere, la lu-

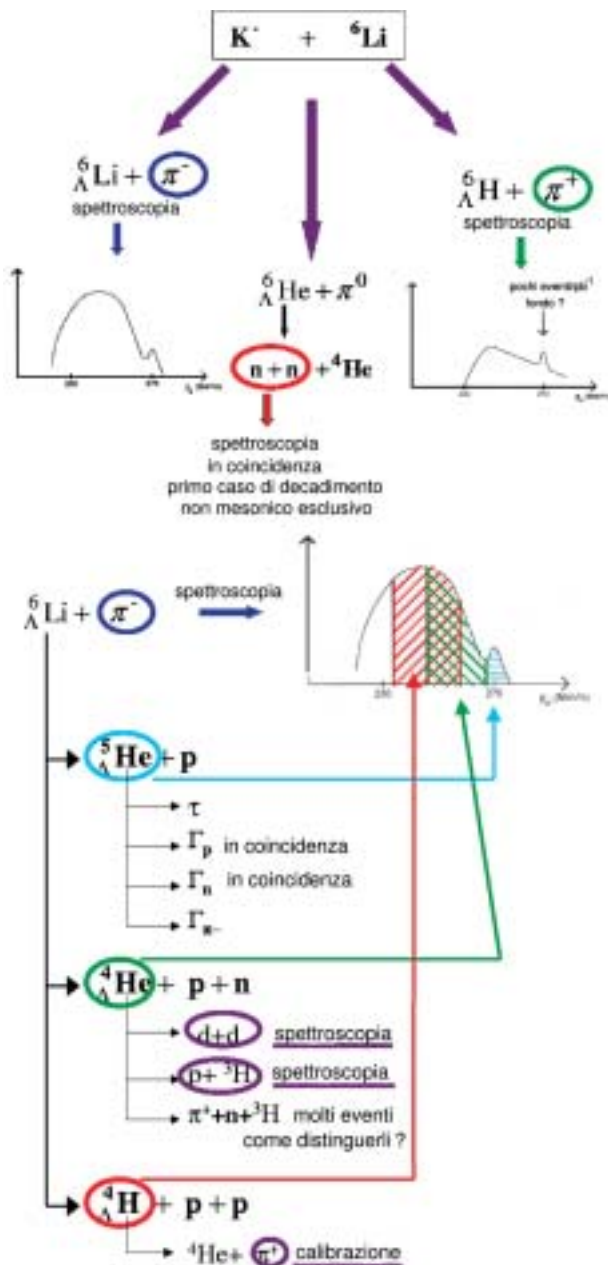


Fig. 7. – Esempio della ricchezza dell’informazione fisica ottenibile con FINUDA: caso di un bersaglio di ${}^6\text{Li}$. La reazione $\text{K}^- + {}^6\text{Li}$ porta alla produzione di tre distinti stati finali: ${}^6\text{Li} + \pi^-$, di cui FINUDA può rivelare il π^- , ${}^6\text{He} + \pi^0$, di cui FINUDA può rivelare i due n del decadimento non mesonico, e ${}^6\text{H} + \pi^+$, di cui FINUDA può rivelare il π^+ . L’ipernucleo ${}^6\text{Li}$ è instabile e decade immediatamente, emettendo uno o più nucleoni, in ${}^5\text{He}$, ${}^4\text{He}$ o ${}^4\text{H}$, come indicato nella parte bassa della figura dove vengono riportati i diversi contributi allo spettro del π^- dovuti ai vari canali del decadimento istantaneo del ${}^6\text{Li}$ e le quantità che si può pensare di misurare per ognuno di essi.

minosità della macchina e il tempo macchina assegnato. Al momento attuale è prevedibile che la presa dati possa iniziare entro la fine del corrente anno, che la luminosità migliori di un fattore 2 e che il periodo di *run* sia di circa tre

mesi. In tali condizioni si potrebbero installare 3 bersagli di ${}^{12}\text{C}$, 2 di ${}^6\text{Li}$, 1 di ${}^7\text{Li}$, 1 di ${}^{89}\text{Y}$ e 1 di ${}^{28}\text{Si}$, o eventualmente ${}^{16}\text{O}$ se si riuscirà a costruire bersagli a pareti sottili, ma rigide, di H_2O . Con questo insieme di bersagli sarà possibile:

- 1) verificare, con una statistica superiore a quella esistente e con una risoluzione 2 volte maggiore, gli spettri di eccitazione di ${}^6\text{Li}$, ${}^7\text{Li}$, ${}^{12}\text{C}$, ${}^{28}\text{Si}$, ${}^{89}\text{Y}$;
- 2) misurare τ_Λ negli ipernuclei sopra citati con precisione maggiore a quella attuale e per la prima volta in ${}^{89}\text{Y}$;
- 3) misurare i rapporti di decadimento non mesonico stimolato dal protone e dal neutrone; questa misura non è mai stata finora effettuata, a parte il caso del ${}^{12}\text{C}$, a bassa statistica;
- 4) determinare possibilmente l’esistenza di ipernuclei ricchi di neutroni, nel caso dei bersagli più leggeri;
- 5) evidenziare l’eventuale esistenza di decadimenti rari a due corpi nel caso del ${}^4\text{He}$, ottenibile come sottoprodotto delle misure con bersagli di ${}^6\text{Li}$.

La ricchezza dell’informazione fisica ottenibile con FINUDA, in virtù dell’accettanza angolare, della buona risoluzione energetica e dell’identificazione del vertice sono schematizzate nella fig. 7.

In una fase successiva, a seguito dei risultati ottenuti da questo primo anno di misure, verranno effettuate altre campagne di misura su altri insiemi di bersagli, per lo più ad A medio-alto, concentrandosi soprattutto sui decadimenti non-mesonici.

Bibliografia

- (1) E. BOTTA e T. BRESSANI, *Il Nuovo Saggiatore*, **17**, no. 3-4 (2002) 11.
- (2) G. VIGNOLA, *Workshop on Physics and Detectors for DAΦNE*, a cura di G. Pancheri (Frascati INFN-LNF, 1991), p. 11.
- (3) H. TAMURA *et al.*, *Nucl. Phys. A* **479** (1988) 161c.
- (4) The FINUDA Collaboration (M. AGNELLO *et al.*), *FINUDA – A detector for nuclear Physics at DAΦNE*, LNF Internal Report, LNF-93/021(IR), 1993; The FINUDA Collaboration (M. AGNELLO *et al.*), *FINUDA Technical Report*, LNF Internal Report, LNF-95/024(IR), 1995.
- (5) M. MARCHESOTTI *et al.*, *Nucl. Instrum. Meth. A* **424** (1999) 343; L. BUSSO *et al.*, *Nucl. Instrum. Meth. A* **432** (1999) 436; V. FILIPPINI *et al.*, *Nucl. Instrum. Meth. A* **457** (2001) 279.
- (6) P. BOTTAN *et al.*, *Nucl. Instrum. Meth. A* **427** (1999) 423; **435** (1999) 153.
- (7) E. BOTTA *et al.*, *Nucl. Instrum. Meth. A* **383** (1996) 566; M. AGNELLO *et al.*, *Nucl. Instrum. Meth. A* **385** (1997) 58; **398** (1997) 167; **452** (2000) 386.
- (8) L. BENUSSI *et al.*, *Nucl. Instrum. Meth. A* **361** (1995) 1809; **379** (1996) 429.
- (9) R. L. GLUCKSTERN, *Nucl. Instrum. Meth.* **24** (1963) 381.
- (10) L. CELANO *et al.*, *Nucl. Instrum. Meth. A* **392** (1997) 304.