

Comitato Nazionale per l'Energia Nucleare
ISTITUTO NAZIONALE DI FISICA NUCLEARE

Laboratori Nazionali
di Legnaro (Padova)

INFN/BE-70/2
25 Febbraio 1970

L. Drigo, C. Manduchi, G. Moschini, M. T. Russo-Manduchi,
G. Tornielli e G. Zannoni: CARATTERISTICHE TECNICHE
E OPERATIVE DI UN POLARIMETRO PER NEUTRONI. -

L. Drigo, C. Manduchi, G. Moschini, M. T. Russo-Manduchi,
G. Tornielli e G. Zannoni: CARATTERISTICHE TECNICHE E
OPERATIVE DI UN POLARIMETRO PER NEUTRONI. -

I. - INTRODUZIONE. -

Il recente sviluppo delle tecniche nucleari consente di considerare la misura di polarizzazione come un utile metodo di indagine, da affiancare alle misure di sezione d'urto, per ottenere informazioni dettagliate sulla struttura nucleare.

E' noto che la "polarizzazione vettoriale \bar{P} " di un fascio di particelle di spin s è definita come il valor medio dell'operatore \bar{s} nello stato $|\psi\rangle$ che descrive il fascio:

$$\bar{P} = \frac{\langle \psi | \bar{s} | \psi \rangle}{\langle \psi | \psi \rangle}$$

Come "misura di polarizzazione" si intende comunemente la determinazione della polarizzazione di particelle prodotte all'angolo θ in una reazione nucleare indotta da un fascio incidente non polarizzato. La misura della polarizzazione è relativamente semplice nel caso di diffusione elastica di particelle a spin $1/2$: in questo caso la sezione d'urto differenziale del processo, essendo \bar{P}_1 la polarizzazione del fascio incidente, è espressa da

$$\sigma(\theta, \varphi) = \sigma_0(\theta) [1 + P_1 P(\theta) \cos \varphi] ,$$

2.

dove $\sigma_0(\theta)$ è la sezione d'urto del processo quando il fascio incidente non è polarizzato, e ψ è l'angolo tra \vec{P}_1 e la normale al piano di diffusione.

Il metodo comunemente seguito è quello di porre due rivelatori agli angoli ψ e $\psi + \pi$, onde determinare l'asimmetria $A(\theta)$ definita da

$$A(\theta) = \frac{\sigma(\theta, \psi) - \sigma(\theta, \psi + \pi)}{\sigma(\theta, \psi) + \sigma(\theta, \psi + \pi)} = P_1 P(\theta) \cos \psi.$$

La determinazione di $A(\theta)$ permette di risalire ad una delle due grandezze P_1 o $P(\theta)$, quando sia nota l'altra.

Lo strumento descritto in questo articolo permette di effettuare, in condizioni di simultaneità, misure di sezione d'urto differenziale e di distribuzione angolare della polarizzazione di neutroni diffusi da nuclei diversi. Esso consiste essenzialmente (v. Fig. 1) in una camera di reazione, generatrice dei neutroni; in una camera di diffusione, dove i neutroni collimati incidono sulla targhetta diffondente; in un sistema di quattordici contatori distribuiti intorno alla camera di diffusione, simmetricamente alla destra e alla sinistra del fascio primario di neutroni. Il polarimetro, costituito dal dispositivo di diffusione e rivelazione, può ruotare intorno alla camera di reazione, al fine di accettare neutroni generati secondo gli angoli compresi fra $\pm 90^\circ$. Le misure di polarizzazione si avvalgono del metodo descritto; le misure di sezione d'urto utilizzano un quindicesimo contatore, disposto sull'asse del fascio primario di neutroni. Le energie dei neutroni sono determinate con la tecnica dei tempi di volo.

Questo strumento, denominato PAROL (Polarization Analyzer Right - 0 - Left), è stato allestito presso i Laboratori Nazionali di Legnaro.

II. - DISPOSITIVO MECCANICO. -

La camera di reazione, dove vengono generati i neutroni, è illustrata in Fig. 2(a): essa è costituita da un dispositivo di collimazione del fascio incidente, con apertura circolare di 4 mm di diametro, elettricamente isolato; da un supporto per targhette solide o aeriformi; da un cilindro di ferro a tenuta di vuoto, di 15 cm di diametro interno, al quale sono connessi collimatore e supporto. Lo spessore della parete del cilindro, nella zona corrispondente alla collimazione dei neutroni generati, è ridotta a 0,8 mm. Collimatore e targhetta sono collegati elettricamente a morsetti esterni, per la misura delle correnti di fascio disperse e utili alla reazione. La camera prevede l'inserimento

Scala 1:20

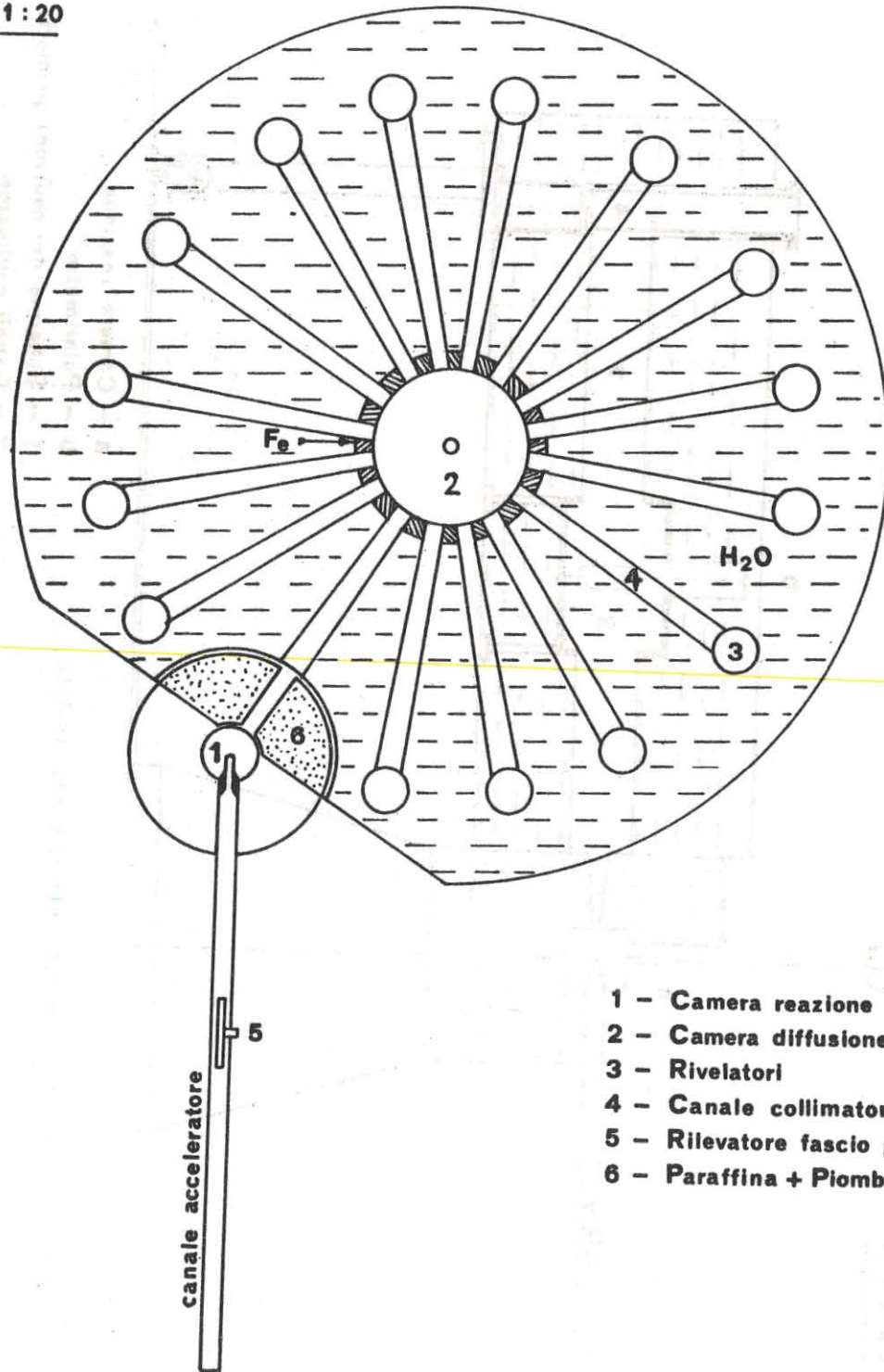


FIG. 1 - Schema illustrativo del dispositivo polarimetrico.

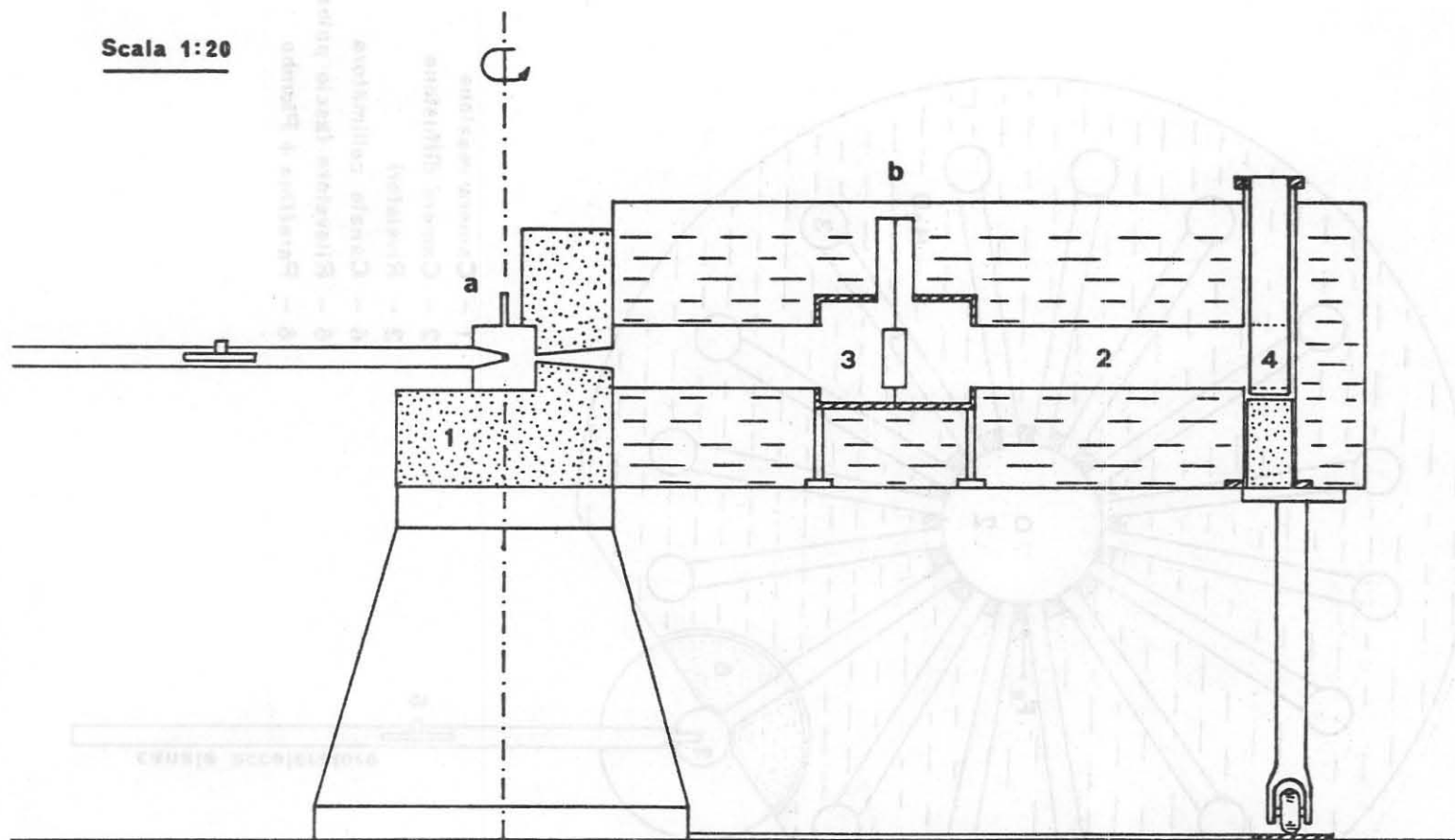


FIG. 2 - Sezione verticale dello strumento.

- a - Camera reazione
- b - Polarimetro
- 1 - Schermo dei neutroni primari
- 2 - Canali collimatori
- 3 - Camera diffusione
- 4 - Contatore a scintillazione

di un dispositivo ausiliario di rivelazione delle particelle cariche associate alla reazione, ed eventualmente del loro grado di polarizzazione.

Uno schermo di paraffina e piombo, solidale con il polarimetro, è libero di ruotare intorno ad un asse verticale coincidente con quello della targhetta generatrice di neutroni: lo schermo presenta un'apertura di collimazione a sezione rettangolare, la quale definisce un angolo zenitale di $+ 1,5^\circ$ ed azimutale di $+ 4,5^\circ$. Lo spessore dello schermo è mediamente di 20 cm, e la sua struttura è atta a proteggere il sistema di rivelazione ed attenuare il flusso di neutroni diffusi verso il pavimento.

Il polarimetro è illustrato in Fig. 2(b): esso è inserito in un contenitore cilindrico di lamiera di ferro; di 250 cm di diametro e 80 cm di altezza, con alloggiamento per lo schermo dei neutroni primari. Il contenitore poggia su un traliccio di ferro libero di ruotare intorno ad un asse verticale, coincidente con quello della targhetta generatrice di neutroni, tramite due ruote correnti su rotaia: la rotazione permette diversi orientamenti del polarimetro rispetto alla direzione del fascio dell'acceleratore, compresi fra $\pm 90^\circ$. Ai fini della schermatura del sistema, il contenitore è di norma riempito di acqua, nella quale è immerso tutto il dispositivo polarimetrico.

La camera di diffusione è contenuta in un cilindro di ferro, di 5 cm di spessore, 44 cm di diametro interno e 25 cm di altezza: il cilindro poggia sul fondo del contenitore mediante tre piedi di altezza regolabile. La base superiore è predisposta per il fissaggio dei supporti delle targhettole, mentre la parete laterale presenta sedici aperture rettangolari per l'innesto dei canali di collimazione. Questi canali connettono la camera di diffusione rispettivamente con l'apertura di collimazione nello schermo dei neutroni primari; con sette rivelatori distribuiti alla destra del fascio neutronico incidente; con un rivelatore disposto sull'asse del fascio stesso; infine con sette rivelatori distribuiti alla sinistra del fascio neutronico.

I canali di collimazione, tutti di uguali dimensioni, sono costruiti in lamiera di ferro: la lunghezza libera è di 66,5 cm, e la sezione rettangolare misura 16 cm di altezza, variando la base da 4,8 cm, all'innesto nella camera di diffusione, a 7,5 cm all'estremità opposta. L'asse dei canali di collimazione connessi con i rivelatori laterali forma con l'asse del collimatore centrale angoli rispettivamente di 25° , 45° , 65° , 90° , 115° , 135° , 155° , per i rivelatori alla destra, ed angoli equivalenti per i rivelatori alla sinistra del fascio neutronico incidente. Lo insieme degli assi dei collimatori, concorrenti nel centro della camera di diffusione, definisce un piano sensibilmente orizzontale

I supporti dei contatori, sui quali si inseriscono i canali di collimazione, sono cilindri verticali in lamiera di ferro, il cui asse inter-

chetta quello dei collimatori: il diametro interno dei cilindri è di 12,6 cm; la base inferiore è connessa al fondo del contenitore; L'asse dei cilindri, coincidente con quello dei rivelatori, dista 100 cm dall'asse della camera di diffusione.

Il dispositivo è attualmente connesso con l'acceleratore C.N. di Legnaro; un rivelatore del fascio pulsato è inserito nel canale della macchina, in prossimità della camera di reazione. In Tabella I sono riassunte le principali caratteristiche tecniche del dispositivo.

TABELLA I

- Distanza "rivelatore fascio÷ asse camera di reazione":	83,8 cm
- Distanza "asse camera di reazione÷ asse camera di diffusione":	108,8 cm
- Distanza "asse camera di diffusione÷ asse rivelatori":	100 cm
- Diametro del fascio collimato dell'acceleratore:	4 mm
- Divergenza del fascio primario di neutroni	angolo zenitale: $+1,5^{\circ}$ angolo azimutale: $+4,5^{\circ}$
- Divergenza massima dei fasci diffusi di neutroni	angolo zenitale: $+3,2^{\circ}$ angolo azimutale: $+12,0^{\circ}$
- Diametro della camera di reazione:	15 cm
- Diametro della camera di diffusione:	44 cm
- Distribuzione angolare dei collimatori laterali:	$+25^{\circ}$, $+45^{\circ}$, $+65^{\circ}$, $+90^{\circ}$, $+115^{\circ}$, $+135^{\circ}$, $+155^{\circ}$

III. - DISPOSITIVO ELETTRONICO. -

I rivelatori dei neutroni sono costituiti da scintillatore liquido NE 213 incapsulato in cilindri di vetro rivestiti di diffusore bianco; la scintillazione è vista, tramite guida di luce, da un fotomoltiplicatore 56 AVP protetto da schermo magnetico: le dimensioni degli scintillatori sono 42 mm di diametro e 158 mm di altezza.

Dai contatori è derivato un segnale veloce (anodo) ed un impulso proporzionale (10^0 dinodo). I segnali veloci sono discriminati in ampiezza e miscelati: il segnale risultante è correlato con il segnale proveniente dal rivelatore del fascio pulsato tramite un convertitore tempo ampiezza, e l'ampiezza dell'impulso corrispondente al ritardo relativo è analizzata da un analizzatore multicanale bidimensionale. L'analizzatore è suddiviso in 16 gruppi di 16 canali, ciascun gruppo corrispondendo ad uno dei quindici contatori e ad un eventuale modulo di servizio: la classificazione dei diversi gruppi avviene tramite segnali di diversa ampiezza, caratteristici dei singoli contatori.

La registrazione del segnale analizzato, corrispondente al tempo di volo della particella rivelata, può avvenire solo quando sussiste contemporaneamente l'indirizzo del gruppo relativo, previa le condizioni definite dal circuito di discriminazione neutronica (v. Fig. 3).

Gli impulsi proporzionali derivati dai quindici contatori sono preamplificati e miscelati: l'impulso risultante è amplificato linearmente e doppiamente differenziato. L'ampiezza dell'impulso conseguente è quindi discriminata con un analizzatore monocanale temporizzatore, il cui segnale in uscita è in corrispondenza temporale con l'istante di inversione dell'impulso differenziato in ingresso. Questo sistema rende possibile, insieme con la definizione di un opportuno intervallo di ampiezze degli impulsi proporzionali, la discriminazione degli eventi relativi ai neutroni rispetto al fondo di gamma. Infatti, il contenuto energetico della componente a lento decadimento nel processo di scintillazione, sostanzialmente diverso per protoni ed elettroni, introduce un diverso istante di inversione del segnale doppiamente differenziato. Questa differenza è messa in evidenza dal confronto temporale fra gli impulsi discriminati dall'analizzatore monocanale ed i segnali derivati dal miscelatore veloce, tramite un convertitore tempo-ampiezza (vedi Fig. 4): un discriminatore provvede quindi alla definizione dell'intervallo di ampiezze relative ai neutroni, promuovendo la loro registrazione mediante l'analizzatore multicanale e bidimensionale (16 x 16).

Gli impulsi derivati dal contatore centrale, rivelatore del fascio di neutroni primari, sono elaborati normalmente insieme agli impulsi derivati dai contatori laterali: è tuttavia possibile deviare la registra-

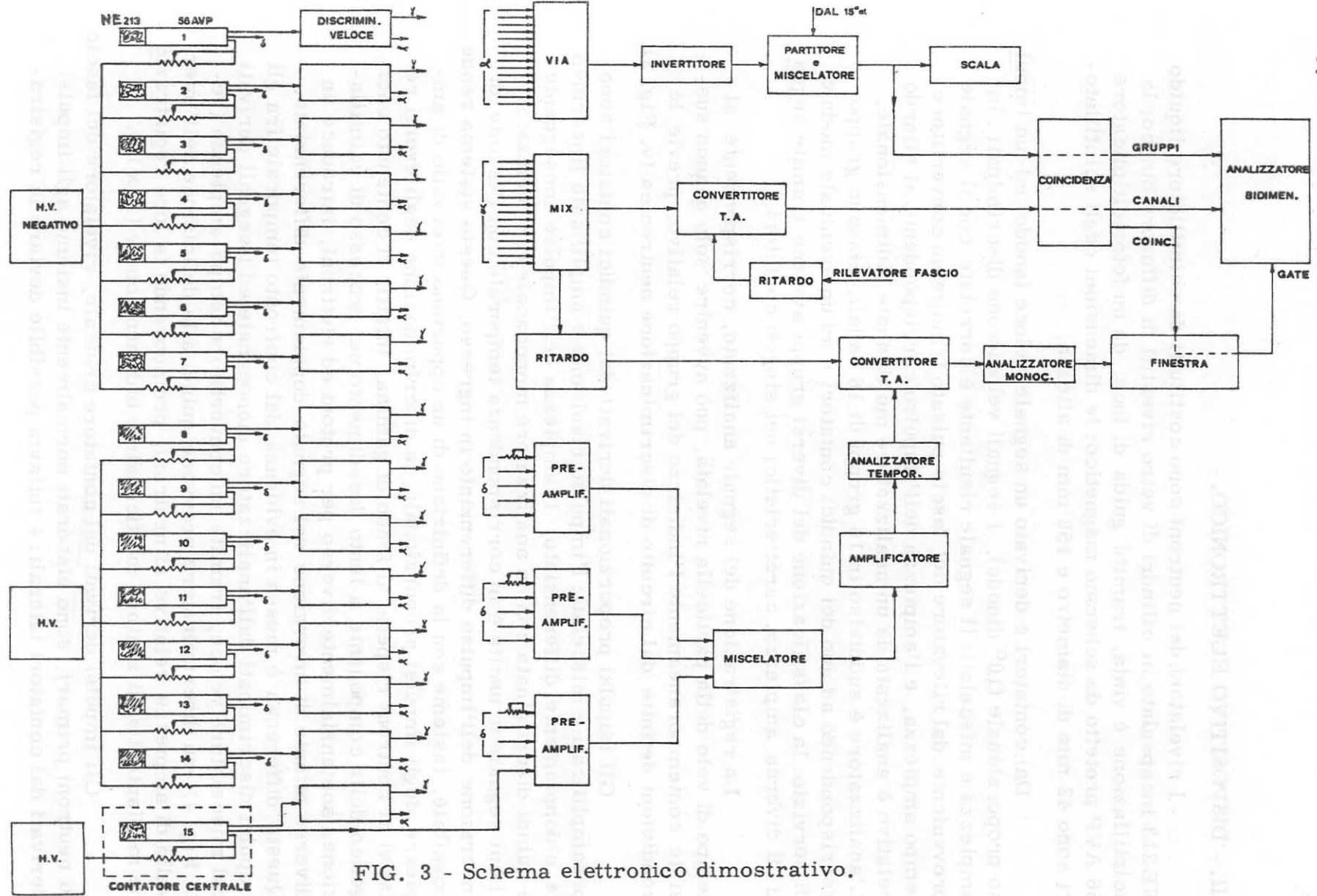


FIG. 3 - Schema elettronico dimostrativo.

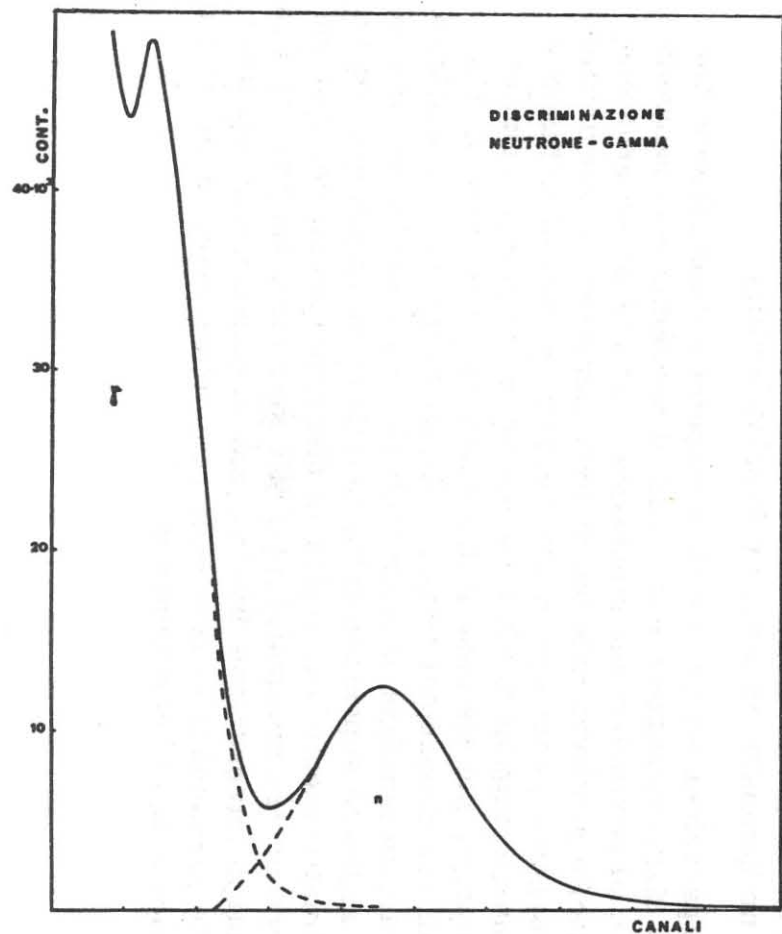


FIG. 4 - Distribuzione degli eventi gamma (γ) e dei neutroni (n) rivelati dall'insieme dei quindici contatori (registrati a titolo illustrativo mediante un analizzatore multicanale).

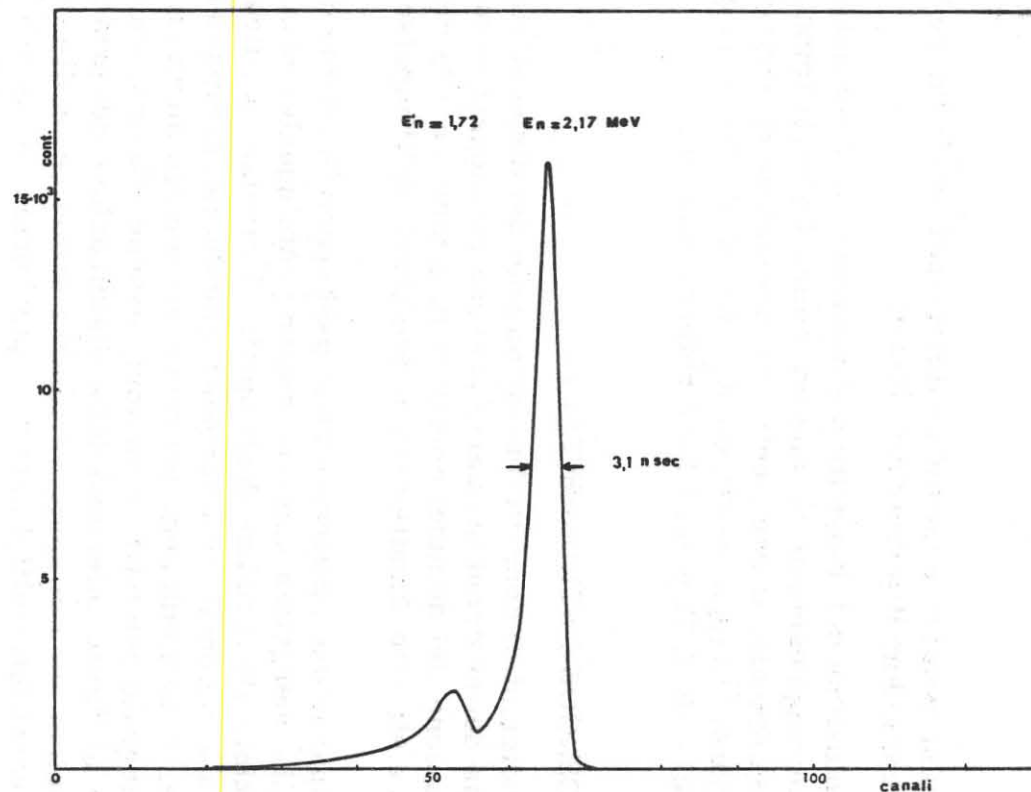


FIG. 5 - Analisi temporale dei neutroni prodotti dalla reazione ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$ rivelati dal contatore centrale.

zione degli impulsi relativi a questo contatore dall'analizzatore multicanale ad una scala demoltiplicatrice veloce.

La risoluzione del dispositivo è mostrata, a titolo indicativo, in Fig. 5, dove è rappresentato lo spettro temporale degli impulsi relativi al contatore centrale, conseguenti alla rivelazione di neutroni prodotti dalla reazione ${}^7\text{Li}(p, n)$ a 0° per $E_p = 3.9$ MeV: l'energia dei due gruppi neutronici è di 1.72 e 2.17 MeV rispettivamente.

IV. - PREDISPOSIZIONE STRUMENTALE.

Le condizioni di corretto funzionamento del dispositivo, essendo nota l'energia dei neutroni primari, possono ricondursi essenzialmente alla equiparazione dei quindici contatori in ordine sia alla risposta spettrometrica e sia alle caratteristiche temporali dell'impulso proporzionale.

L'equiparazione spettrometrica predispone l'insieme dei contatori ad una soglia energetica approssimativamente uguale: essa si avvale della sostanziale similitudine degli spettri γ rivelati dai diversi contatori, quando sia introdotta una sorgente gamma nel centro della camera di diffusione. Il procedimento provvede al conseguimento di un uguale spettro γ integrale per tutti i contatori, essendo fissata una soglia corrispondente al limite inferiore della distribuzione dei protoni di rinculo. Le condizioni sono ottenute variando i valori delle alte tensioni applicate ai diversi fotomoltiplicatori, e più finemente agendo sui discriminatori dei segnali veloci: l'equiparazione è agevolata dalla registrazione simultanea dello spettro integrale dei quindici contatori mediante l'analizzatore multicanale, in funzione di scala multipla.

L'equiparazione temporale degli impulsi è essenziale ai fini di una corretta discriminazione neutronica: il procedimento provvede essenzialmente ad attribuire una medesima costante di integrazione ai circuiti di uscita proporzionale dei diversi contatori. A questo fine si utilizza la sorgente gamma predisposta nella camera di diffusione, e si considerano gli impulsi di conversione tempo-ampiezza relativi ai quindici contatori, nel sistema di discriminazione neutronica. Gli spettri integrali corrispondenti vengono registrati mediante l'analizzatore multicanale, in funzione di scala multipla, essendo fissata una soglia prossima al limite superiore della distribuzione impulsiva, equivalente approssimativamente alla soglia di discriminazione dei neutroni. Eventuali differenze fra gli spettri integrali sono riconducibili essenzialmente a costanti di integrazione diverse, che di conseguenza possono essere corrette variando il valore delle resistenze inserite nei circuiti di accoppiamento dei diversi contatori.

I procedimenti di messa a punto della strumentazione, e i successivi controlli nel corso delle misure, sono stabiliti in modo da introdurre minime variazioni nel sistema logico, e richiedono tempi relativamente modesti.

V. - CARATTERISTICHE STRUMENTALI. -

Lo strumento che qui si descrive è stato progettato essenzialmente per misure di polarizzazione: a tale scopo, la predisposizione strumentale secondo le procedure descritte è sufficiente per la condotta delle misure. Eventuali asimmetrie intrinseche del dispositivo possono essere ovviate alternando le misure in posizioni simmetriche rispetto al fascio dell'acceleratore, equivalenti a versi opposti del vettore di polarizzazione \bar{P} .

Per misure assolute di sezioni d'urto differenziali è necessario procedere a valutazioni complementari, relative essenzialmente all'efficienza dei rivelatori per energie diverse dei neutroni, ed all'efficienza dei rivelatori laterali rispetto a quella del rivelatore centrale:

La dipendenza dell'efficienza dall'energia dei neutroni è stata determinata, a titolo rappresentativo, per il contatore centrale nelle condizioni ordinarie di misura: in Tab. II sono riportati i conteggi rela

TABELLA II

Neutroni rivelati dal contatore centrale per valori diversi della carica Q . I conteggi relativi alle diverse energie sono normalizzati a ugual numero di neutroni incidenti.

E (MeV)	Q = 22	Q = 100
4,10	65.949	300.424
4,29	66.273	303.129
4,47	68.195	310.476
4,70	67.649	308.055
4,83	66.094	303.362
4,99	67.690	305.520

tivi ad alcune energie, per due diversi valori della carica Q (unità arbitraria) raccolta dalla targhetta generatrice di neutroni. Esprimendo l'efficienza con la relazione

$$\mathcal{E}(E) = \frac{I}{I_0}$$

dove I_0 ed I sono le intensità dei neutroni di energia E incidenti e rivelati, appare evidente dai dati riferiti che l'efficienza è indipendente dall'energia nell'intervallo considerato, almeno entro i limiti dell'incertezza statistica:

La determinazione dell'efficienza relativa dei contatori si avvale di una sorgente neutronica [$^{241}\text{Am-Be}$] introdotta nel centro della camera di diffusione, essendo il dispositivo predisposto in condizioni di misura. La distribuzione in energia dei protoni di rinculo (v. Fig. 6) rivelati entro i limiti energetici imposti dalle particolari esigenze sperimentali, appare analoga agli spettri inerenti ai neutroni monoenergetici: è quindi possibile riferire l'efficienza dei contatori agli integrali delle distribuzioni prodotte dai neutroni della sorgente, registrati dallo analizzatore multicanale in funzione di scala multipla;

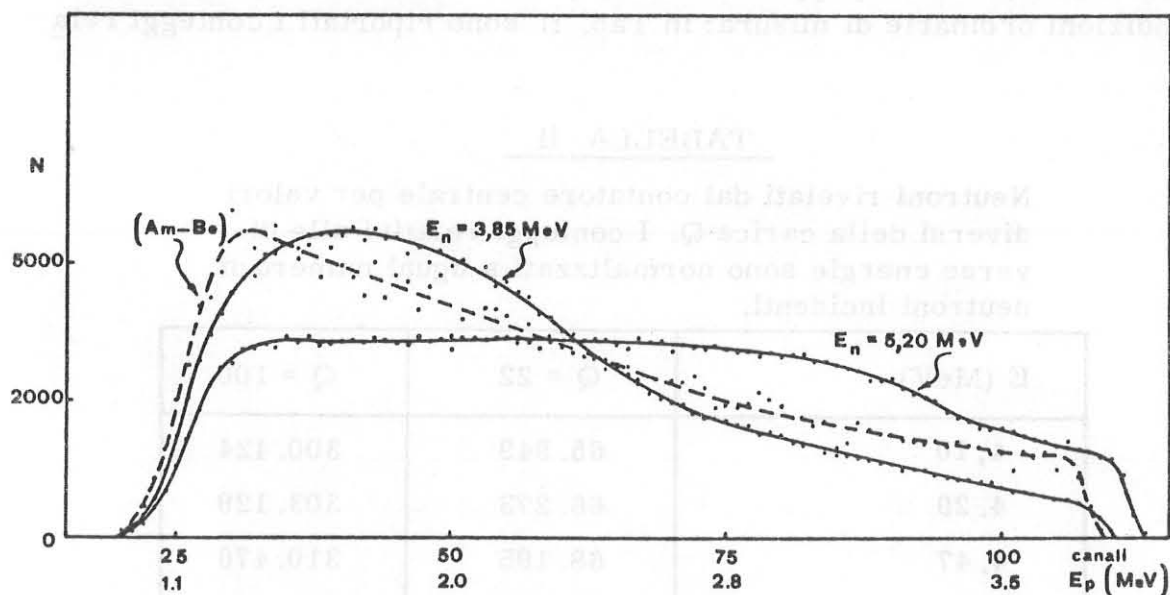


FIG. 6 - Distribuzioni in energia dei protoni di rinculo, conseguenti a neutroni monoenergetici (linea continua) ed a neutroni da sorgente [$^{241}\text{Am-Be}$] (linea tratteggiata).

VI. - PROCEDURA SPERIMENTALE. -

Per una più chiara esposizione della condotta sperimentale, si riferisce il procedimento seguito in una serie di misure intese a verificare le caratteristiche strumentali del dispositivo. Queste misure, i cui risultati sono in corso di pubblicazione, si riferiscono ai neutroni diffusi elasticamente da ^{12}C , per i quali si vuole determinare la dipendenza angolare della polarizzazione e della sezione d'urto.

I neutroni vengono generati tramite la reazione $^7\text{Li}(p, n)$, per energie comprese fra 1,9 e 2,8 MeV, e la reazione $\text{D}(d, n)$ per energie superiori. Il litio è depositato su base di tantalio nella forma di LiF ; il deuterio è contenuto in cilindretto di acciaio inox, di 0,8 cm di diametro e 1,8 cm di lunghezza, nel quale il fascio di deutoni entra attraverso un diaframma di Havar dello spessore di 2,4 μm .

La targhetta di carbonio è costituita da un cilindro di grafite di 4,8 cm di diametro e 16,0 cm di lunghezza, il cui asse coincide con l'asse della camera di diffusione: la targhetta è facilmente trasferibile dalla normale posizione di misura in un alloggiamento, esterno al fascio primario, al fine di eseguire misure di fondo.

Le condizioni sperimentali concernenti una particolare misura sono riferite in Tabella III. Il procedimento di acquisizione dei dati prevede, in successione, misure su neutroni diffusi e di fondo, essendo il polarimetro alternativamente in posizioni simmetriche rispetto al fascio dell'acceleratore. Spettri tipici dei neutroni, registrati con lo analizzatore multicanale, sono mostrati in Fig. 7; la dipendenza angolare della polarizzazione dei neutroni diffusi da carbonio, dedotta secondo le condizioni sperimentali esposte in Tabella III, è presentata in Fig. 8a. L'incertezza maggiore nella valutazione dei risultati deriva dal contributo di fondo: correzioni inerenti al profilo del fascio di neutroni incidenti e diffusi, ad imperfetto allineamento meccanico, e ad instabilità elettronica, risultano di minore importanza rispetto agli errori statistici della misura.

La sezione d'urto differenziale, in ordine alla configurazione geometrica del dispositivo, può essere espressa dalla relazione:

$$\sigma(\theta) = (N_i/N_o) (\mathcal{E}_o/\mathcal{E}_i) (S/\Omega_T) (r_T^2/r_o^2) (1/N_T),$$

dove N_i è il numero di neutroni rivelati dal contatore laterale i -esimo, di efficienza \mathcal{E}_i ; N_o il numero di neutroni rivelati dal contatore centrale, in assenza di diffusore, di efficienza \mathcal{E}_o ; S è la sezione longitudinale del rivelatore centrale; Ω_T è l'angolo solido secondo cui un rivelatore

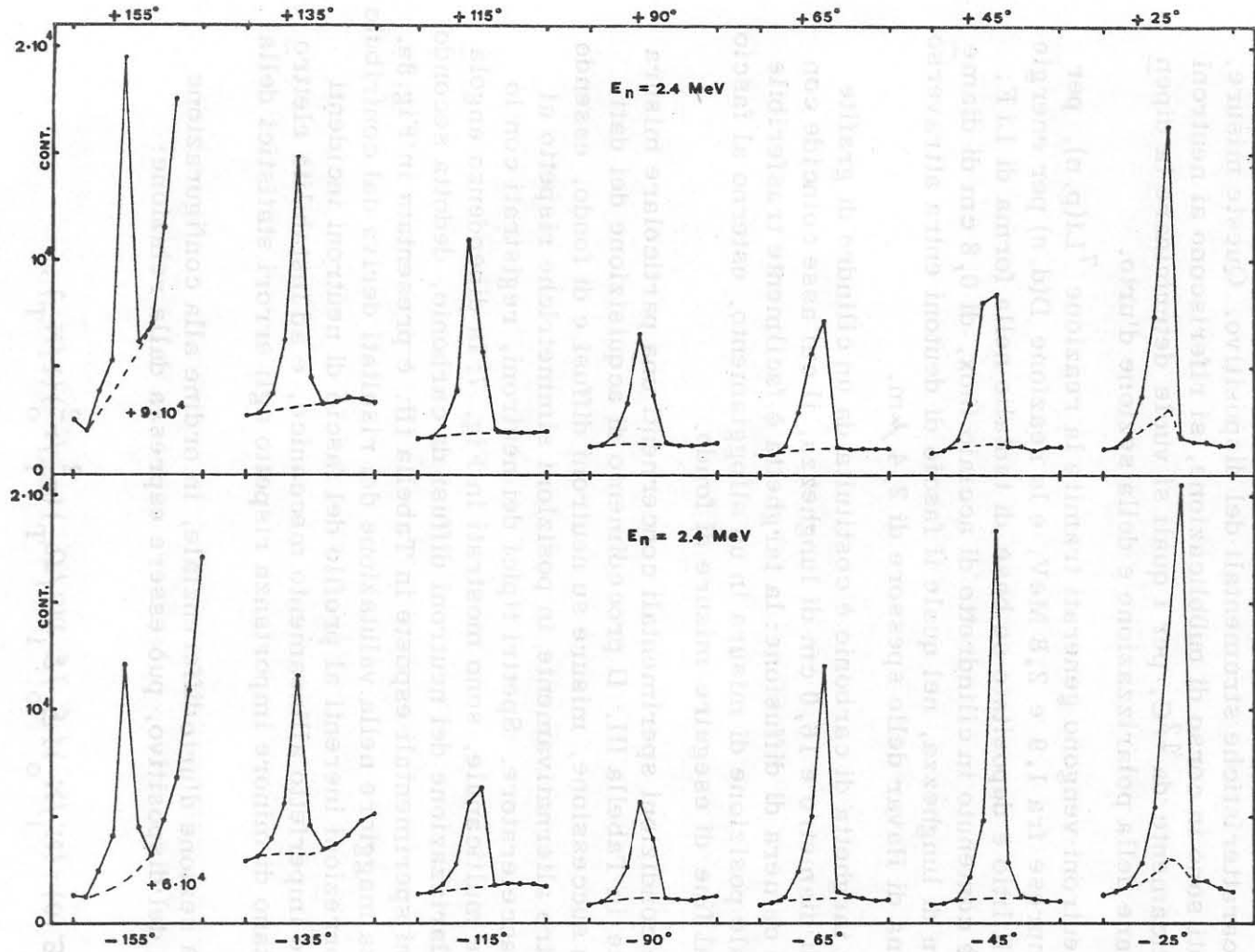


FIG. 7 - Spettri tipici dei neutroni diffusi da carbonio, relativi ai quattordici contatori laterali, registrati mediante l'analizzatore multicanale: in linea tratteggiata sono i corrispondenti spettri di fondo.

vede la targhetta; r_0 ed r_T sono le distanze dalla sorgente neutronica del contatore centrale e rispettivamente della targhetta; N_T è il numero di atomi costituenti la targhetta. I dati relativi a coppie di contatori simmetrici rispetto al fascio di neutroni incidenti sono mediati.

La valutazione della sezione d'urto richiede una misura accurata della efficienza relativa dei contatori: questa misura, che si avvale della sorgente neutronica [$^{241}\text{Am-Be}$], è soggetta agli errori che possono derivare dalla inesatta corrispondenza fra le distribuzioni dei protoni di rinculo relative ai neutroni della sorgente e a quelli diffusi dalla targhetta. In Fig. 8b è rappresentata la dipendenza angolare della sezione d'urto nella diffusione di neutroni da carbonio, corrispondente alla misura di polarizzazione già esposta: gli errori riportati rappresentano una combinazione quadratica media delle diverse incertezze di cui la misura stessa è gravata.

TABELLA III

Caratteristiche sperimentali rappresentative

- Targhetta generatrice di neutroni:	deuterio a	0,94 atm.
- Energia del fascio di deutoni:		2,46 MeV
- Intensità media e frequenza della pulsazione del fascio:		1,1 μA ; 3 MHz
- Larghezza dell'impulso di deutoni:		2 nsec
- Angolo fra i neutroni collimati e i deutoni incidenti:		40°
- Energia dei neutroni collimati:		4,70 \pm 0,08 MeV
- Tempo di volo dei neutroni dalla sorgente alla targhetta:		36,4 \pm 0,2 nsec
- Risoluzione temporale dell'analizzatore multicanale:		7 nsec/can.
- Intervallo energetico dei protoni di rinculo rivelati:		0,9 \div 3,9 MeV
- Angolo solido secondo cui un rivelatore vede la targhetta:		7,2 $\times 10^{-3}$ sterad.

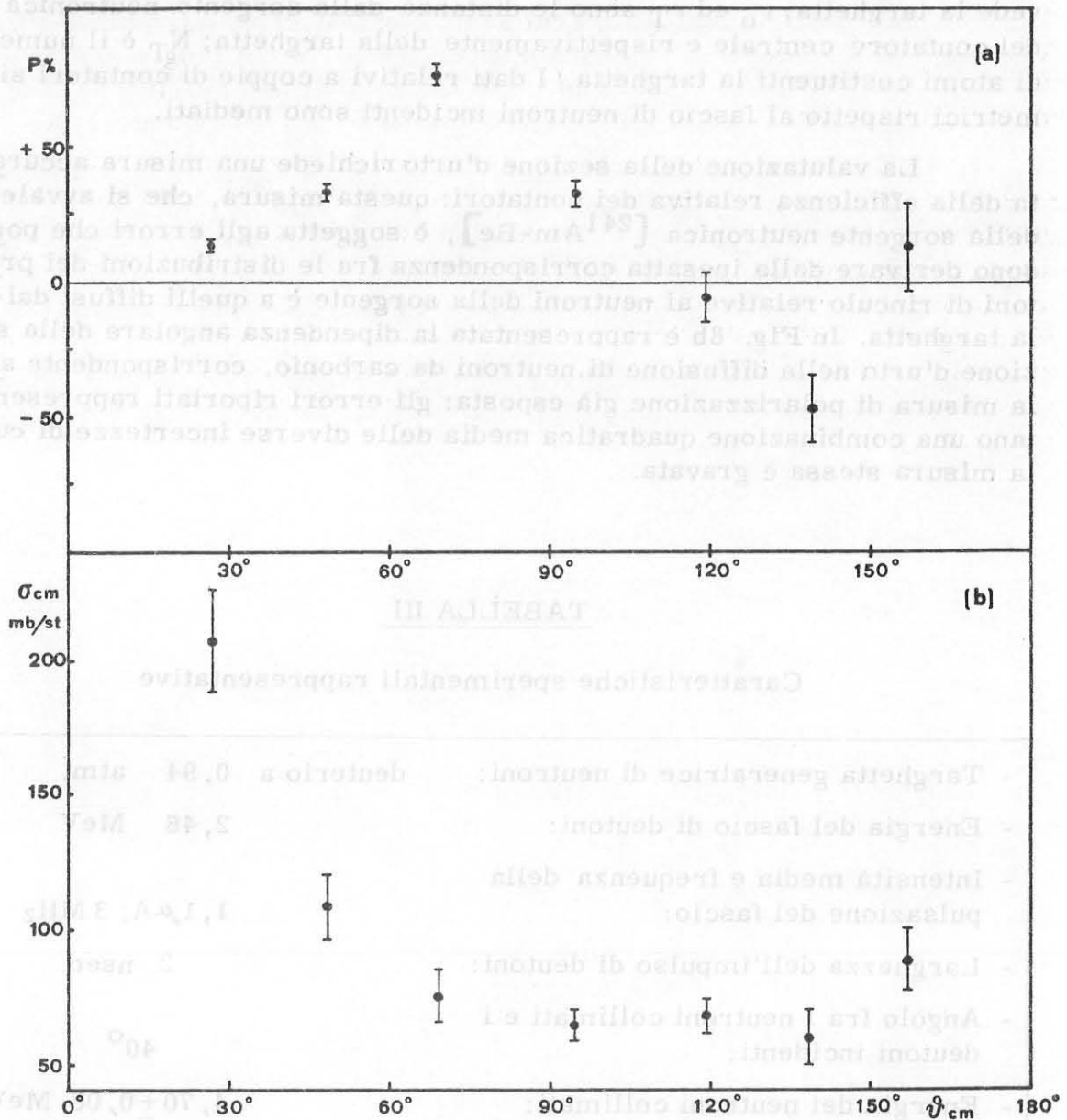


FIG. 8 - Dipendenza angolare sperimentale della polarizzazione (a) e della sezione d'urto (b) dei neutroni diffusi elasticamente da ^{12}C . La polarizzazione P_1 dei neutroni prodotti dalla reazione $\text{D}(\text{d}, \text{n})^3\text{He}$ è stata dedotta per interpolazione da un nostro recente lavoro (Lettere al Nuovo Cimento 1, 237 (1969)). I dati sperimentali non sono corretti per diffusione multipla.

Il polarimetro è stato realizzato con il concorso finanziario dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare. Si vuole qui ringraziare in particolare il Prof. G.C. Nardelli per la sua preziosa collaborazione iniziale; l'Ing. P. Kusstatscher, direttore tecnico dei Laboratori Naz. di Legnaro, per gli utili suggerimenti in sede di progetto; ed il Sig. E. Maccato, capo dell'officina meccanica dei Laboratori Naz. di Legnaro, per il valido contributo tecnico nella realizzazione dello strumento.