

LNF-74/58(R)

31 Ottobre 1974

A. Zucchiatti, M. Sanzone e E. Durante: TELESCOPIO E,
dE/dx DI CONTATORI A SCINTILLAZIONE PER PROTONI
FINO A 120 MeV.

A. Zucchiatti^(o), M. Sanzone^(o) e E. Durante^(o): TELESCOPIO E, dE/dx
DI CONTATORI A SCINTILLAZIONE PER PROTONI FINO A 120 MeV^(x). -

1. - INTRODUZIONE. -

Lo studio delle reazioni fotonucleari ad energie intermedie (cioè tra la risonanza gigante e la soglia pionica) comporta un problema non indifferente per quel che riguarda il rivelatore dei prodotti di reazione.

Le sezioni d'urto oltre la risonanza gigante diminuiscono fortemente; ne deriva la necessità di rivelatori a grande efficienza anche geometrica.

Il duty-cycle del fascio di fotoni che si utilizza, è, di solito, molto basso ($\approx 10^{-3}$) e questo comporta alti fondi e rischi di impilamento di impulsi, con conseguente perdita di risoluzione. E' da notare che se si vogliono mettere in evidenza processi che lasciano il nucleo residuo nello stato fondamentale o in stati eccitati, occorre in questo intervallo energetico una risoluzione energetica FWHM almeno del 4%. Nel caso specifico dell'esperimento per il quale il presente apparato è stato studiato⁽¹⁾, essendo il fascio di fotoni utilizzato monocromatico con una risoluzione energetica $\approx 2\%$, l'optimum sarebbe una risoluzione energetica confrontabile anche per il rivelatore di protoni.

Le richieste sulla efficienza e sulla risoluzione hanno indirizzato la scelta su un telescopio tipo E dE/dx di contatori a scintillazione e precisamente come contatore E uno scintillatore NaI(Tl) di spessore 5 cm e superficie di diametro 11 cm da accoppiare ad un fototubo a grande superficie catodica (XP 1040 o 58 AVP Philips) e come contatore dE/dx uno scintillatore plastico di spessore 3 mm e super-

(x) - Lavoro svolto nell'ambito del progetto gamma monocromatici.

(o) - Istituto di Fisica dell'Università di Genova e INFN, Sezione di Genova.

2.

ficie paragonabile all'altro. L'uso di uno scintillatore plastico come contatore E è infatti da scartare a causa della risoluzione, mentre lo uso di contatori a stato solido o di spettrometri magnetici è da scartare a causa dell'angolo solido e/o del costo. Essendo però la costante di decadimento dello NaI(Tl) $\tau \simeq 280$ nsec, con questo tipo di scintillatore sussiste il problema della perdita di risoluzione (sia in energia che in massa) dovuta ad impilamento del fondo.

Lo studio riportato in questo lavoro riguarda appunto il problema della velocificazione delle coincidenze e del segnale dal contatore E, senza perdita apprezzabile di risoluzione, e inoltre l'ottimizzazione della risoluzione del contatore dE/dx che, a causa della particolare geometria dello scintillatore, presenta disomogeneità da punto a punto e bassa efficienza di raccolta di luce.

2. - CONTATORE E. -

Il contatore E consiste in uno scintillatore NaI(Tl) cilindrico di altezza 5 cm e diametro 11 cm con spessore morto davanti di ~ 150 mg/cm² di Al accoppiato otticamente direttamente ad un fototubo XP 1040 o 58 AVP Philips (Figura 1).

Pur essendo la risoluzione intrinseca dei cristalli NaI(Tl) molto buona, la risoluzione del contatore dipende molto fortemente dal contatto ottico tra cristallo e fototubo e dalla omogeneità di risposta del fotocatodo che in questi fotomoltiplicatori a larga superficie non è mai molto buona. Come esempio mostriamo la risposta di un fototubo non selezionato (ma scelto tra tre 58 AVP in dotazione al laboratorio).

Per il test sono stati usati i fotoni da 1.17 MeV e 1.33 MeV (Figura 2) di una sorgente di Co⁶⁰ altamente collimata, e sono stati investiti vari punti della superficie del contatore (v. Figura 3). I punti sulla mappa si riferiscono a punti del fotocatodo, non del cristallo. Infatti, per verificare se la disomogeneità dipendeva del cristallo, dal fotocatodo o dal contatto ottico, è stato più volte ruotato il cristallo rispetto al fotocatodo ed è stato rifatto il contatto ottico. E' da notare a questo proposito che, data la connessione ottica diretta cristallo fototubo e la collimazione della sorgente, è interessata ogni volta una zona abbastanza ristretta di fotocatodo attorno al punto di riferimento della mappa.

I risultati ottenuti sono riportati in Tabella I.

Tenuto conto che i punti 1, 2, 3 e 4 sono equidistanti dal centro e così pure i punti 5, 6, 7 e 8 appare chiaro che la disomogeneità di risposta nella zona dei punti 3, 4, 7 e 8 dipende dal fotocatodo e non da disuniformità di raccolta di luce da punti più o meno periferici del cristallo.

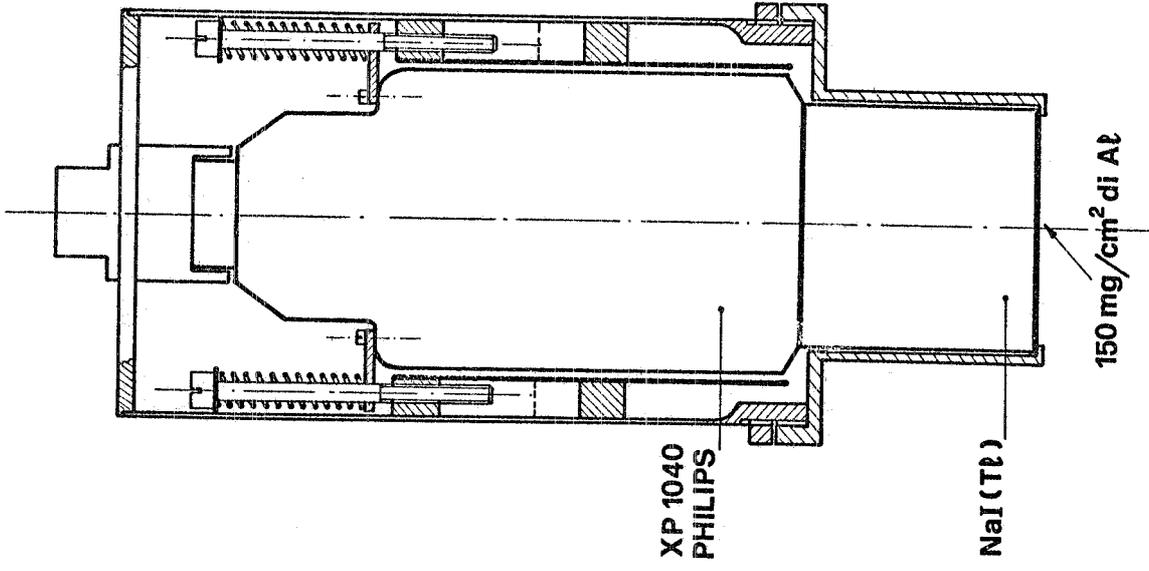


FIG. 1

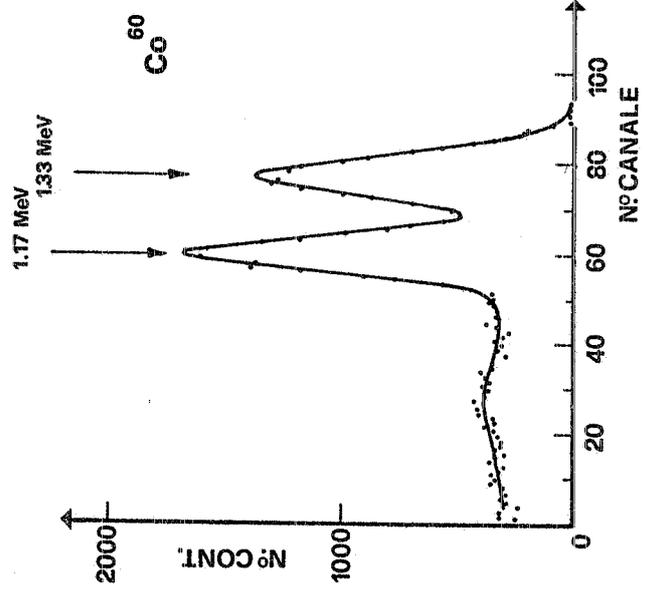


FIG. 2

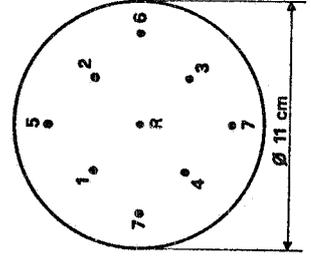


FIG. 3

TABELLA I

Punto	Canale 1.17 MeV	Canale 1.33 MeV
R	60.5 ± 0.5	78. ± 0.5
1	61.	78.
2	62.	79.
3	57.	74.
4	56.5	73.5
5	61.5	78.
6	53.5	77.
7	54.	71.
8	58.5	76.

Volendo ottenere nel nostro caso una risoluzione dell'ordine del 2% occorre che la disomogeneità di risposta del fotocatodo su tutta la superficie utilizzata non sia superiore a $\sim 1\%$. Questo si è potuto ottenere solo con un fototubo altamente selezionato, dalla casa fornitrice, su specifica richiesta.

L'altro problema da affrontare con i cristalli NaI(Tl) è quello dell'impilamento degli impulsi, quando si ha a che fare con una alta velocità di conteggio o con un alto fondo, come nel caso trattato.

La forma dell'impulso all'anodo di un fotomoltiplicatore connesso otticamente ad un cristallo NaI(Tl) mostra un tempo di salita tipicamente dell'ordine di 20 nsec seguito da un decadimento esponenziale con una costante tempo $\tau \simeq 280$ nsec. Sovrapposta a questa forma mediata dell'impulso vi sono fluttuazioni statistiche che hanno origine dalla natura stocastica della raccolta dei fotoelettroni primari nel fotocatodo.

L'informazione dell'energia persa dalla particella nel cristallo è data dall'integrale dell'impulso piuttosto che dalla sua altezza, e questo è tanto più vero quanto più basso è il numero di fotoelettroni per unità di tempo nell'impulso o anche quanto più grande è il rapporto tra il valor medio dell'impulso e le fluttuazioni sovrapposte.

Inoltre la risoluzione del contatore riflette due distinte classi di effetti: l'effetto statistico associato al numero finito di fotoelettroni primari raccolti e gli effetti non statistici che includono la disomogeneità di risposta del cristallo o del fotocatodo, il contatto ottico, la fuga di luce dalle superfici laterali del cristallo, l'impilamento di impulsi dovuti all'alto fondo, etc. L'effetto statistico R_s si può valutare

conoscendo il numero di fotoelettroni P raccolti per unità di energia deposta nel cristallo e dipende dall'energia secondo la legge $1/\sqrt{PE}$ data dalla statistica di Poisson. I rimanenti effetti, soprattutto nel caso di rivelazione di particelle cariche, si può affermare in prima approssimazione che non dipendono dalla energia, e determinano quindi una risoluzione intrinseca R_0 del sistema di rivelazione.

La risoluzione R_{tot} del sistema è data da

$$R_{tot} = \sqrt{R_s^2(E) + R_0^2}$$

A basse energie predomina il termine statistico, ad alte energie esso diventa trascurabile rispetto a R_0 e quindi

$$R_{tot} \simeq R_0$$

R_0 contiene anche l'effetto di impilamento dovuto all'alto fondo che è tanto maggiore quanto più grande è la durata dell'impulso analizzato.

La misura dell'energia ottenuta integrando solo una parte Δt dell'impulso dal fotoanodo, diminuisce l'effetto di impilamento e quindi $R_0(\Delta t)$. D'altra parte R_s aumenta

$$R_s(E, \Delta t) = \frac{1}{[PE(1 - e^{-\Delta t/\tau})]^{1/2}}$$

Essendo però ad alte energie $R_s \ll R_0$, è possibile, fissata la energia minima E_0 delle particelle che si vogliono rivelare, scegliere opportunamente Δt in modo tale che

$$R_s(E > E_0, \Delta t) \ll R_0(\Delta t)$$

In pratica il taglio temporale dell'impulso si ottiene mediante cavo di lunghezza corrispondente a tempo di propagazione $\Delta t/2$, chiuso in fondo su resistenza variabile. L'impulso tagliato a cavo cortocircuitato in fondo presenta una coda di segno opposto (di area uguale all'impulso stesso) mentre è possibile, scegliendo opportunamente la resistenza terminale, ottenere un impulso che ritorna praticamente a zero dopo $\Delta t^{(2)}$. Nella Figura 4 è mostrato come sia possibile risolvere ed analizzare singoli eventi separati tra loro da un intervallo di tempo maggiore di Δt , ma che si presenterebbero impilati in condizioni normali. E' chiaro che esiste un limite inferiore di Δt ; esso è legato al tempo di salita dell'impulso, per cui è opportuno che $\Delta t \gg 60$ nsec.

6.

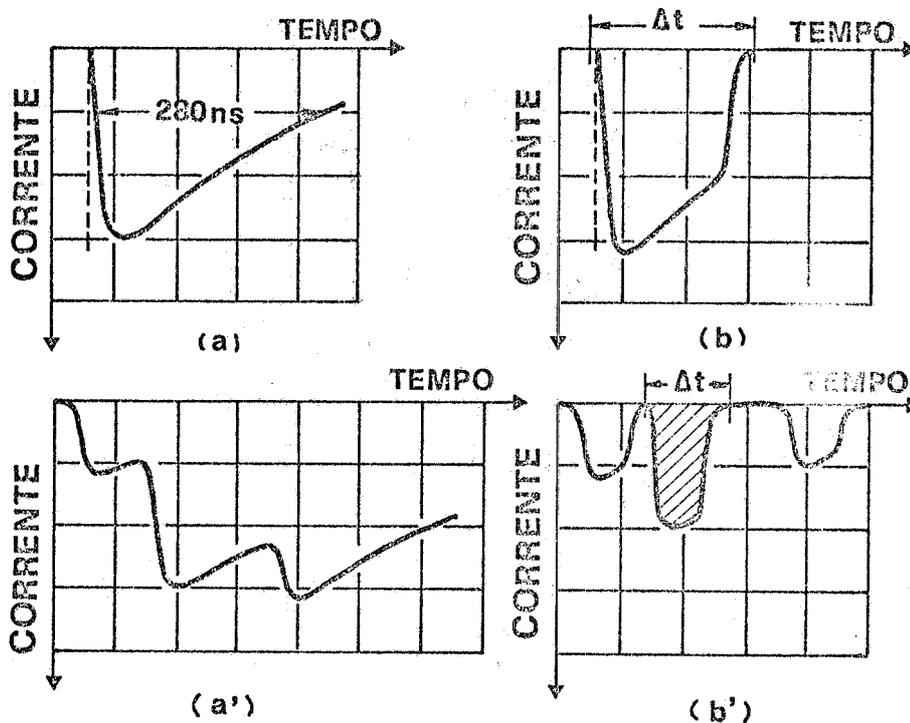


FIG. 4 - Corrente all'uscita del fotoanodo in condizioni normali (a a') e con taglio a cavo (b b').

3. - CONTATORE dE/dx . -

Il rivelatore dE/dx consiste in una lastra di scintillatore plastico NE 102 A di spessore 3 mm e dimensioni di almeno 110 mm.

Il problema principale di questo tipo di contatore, in cui occorre raccogliere la luce prodotta nello scintillatore attraverso una superficie di 3 x 110 mm, è quello di ottenere una buona efficienza di raccolta e buona omogeneità di risposta su tutta la superficie utilizzata.

Connettere lo scintillatore a un fototubo attraverso una normale guida di luce porta a disomogeneità da punto a punto anche dell'ordine del 40-50% il che pregiudica una buona risoluzione in massa delle particelle. Una soluzione possibile si è dimostrata quella schematizzata in Fig. 5. La lastra, di superficie 150x150 mm onde diminuire gli effetti di bordo nella zona interessata, è accoppiata otticamente a due fototubi 56 AVP Philips attraverso guide di luce formate da 6 settori di 30 mm di larghezza ciascuno, separate otticamente tra loro. Altri due settori di 15 mm di larghezza sono posti lateralmente per completare l'accoppiamento ottico. Il contatto ottico tra scintillatore e guide di luce è realizzato mediante il collante solido NE 580 della Nuclear Enterprises, allo scopo di assicurare una buona compattezza e stabilità allo insieme.

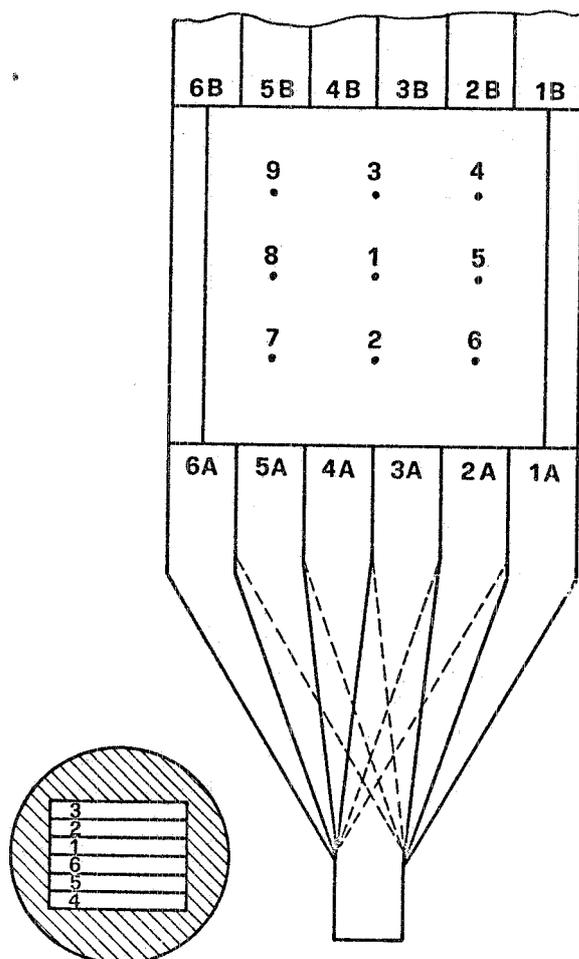


FIG. 5

(Fig. 7) la metà altezza della discesa, perchè affetto da minor indeterminatezza rispetto al punto di massimo.

Le uscite degli anodi dei due fotomoltiplicatori sono state sommate direttamente su una resistenza da 50Ω . La tensione di alimentazione di ciascun fototubo e la sua focalizzazione è stata scelta in modo tale da assicurare identità di risposta dei due fototubi per punti equidistanti da ciascuno di essi (es. punto 3 per il fototubo B e punto 2 per il fototubo A, punto 1 per entrambi etc.). La mappa dei punti utilizzati è mostrata nella Figura 5.

Nella Tabella II sono riportati i risultati ottenuti sul prototipo di contatore dE/dx realizzato.

Essi mostrano uno scarto massimo della media di $\pm 5\%$ in accordo con quanto previsto teoricamente.

La forma dei diversi settori che costituiscono una guida di luce è stata studiata⁽³⁾ in base alle usuali leggi dell'ottica e con lo scopo di ottenere una disuniformità massima di raccolta di luce non superiore al 5%. Alla disomogeneità effettiva contribuiscono inoltre effetti di disuniformità dei settori, del contatto ottico scintillatore-guida di luce, del fotocatodo etc.

Al fine poi di compensare effetti periferici della risposta del fotocatodo del 56 AVP, i settori sono stati opportunamente piegati in modo tale che quelli più laterali fossero accoppiati alla zona più centrale della superficie del fotomoltiplicatore (Figg. 5 e 6).

Per verificare l'effettiva disomogeneità ottenuta si è utilizzata una sorgente di Tl^{204} altamente collimata, prendendo come punto di riferimento dello spettro β^-

8.

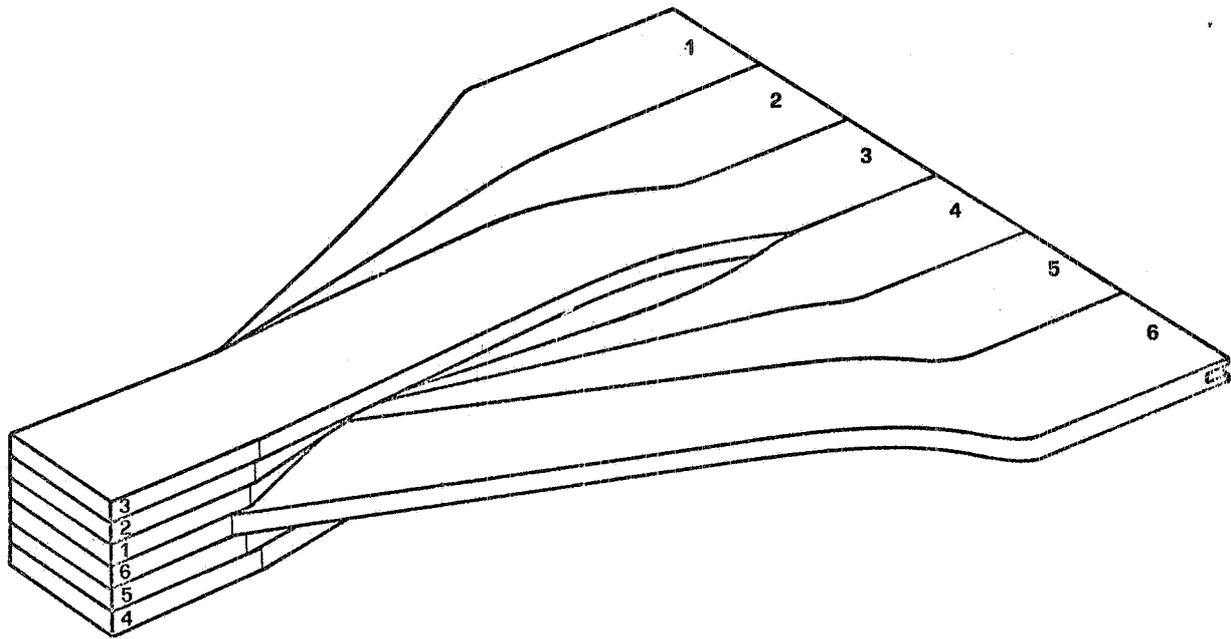


FIG. 6

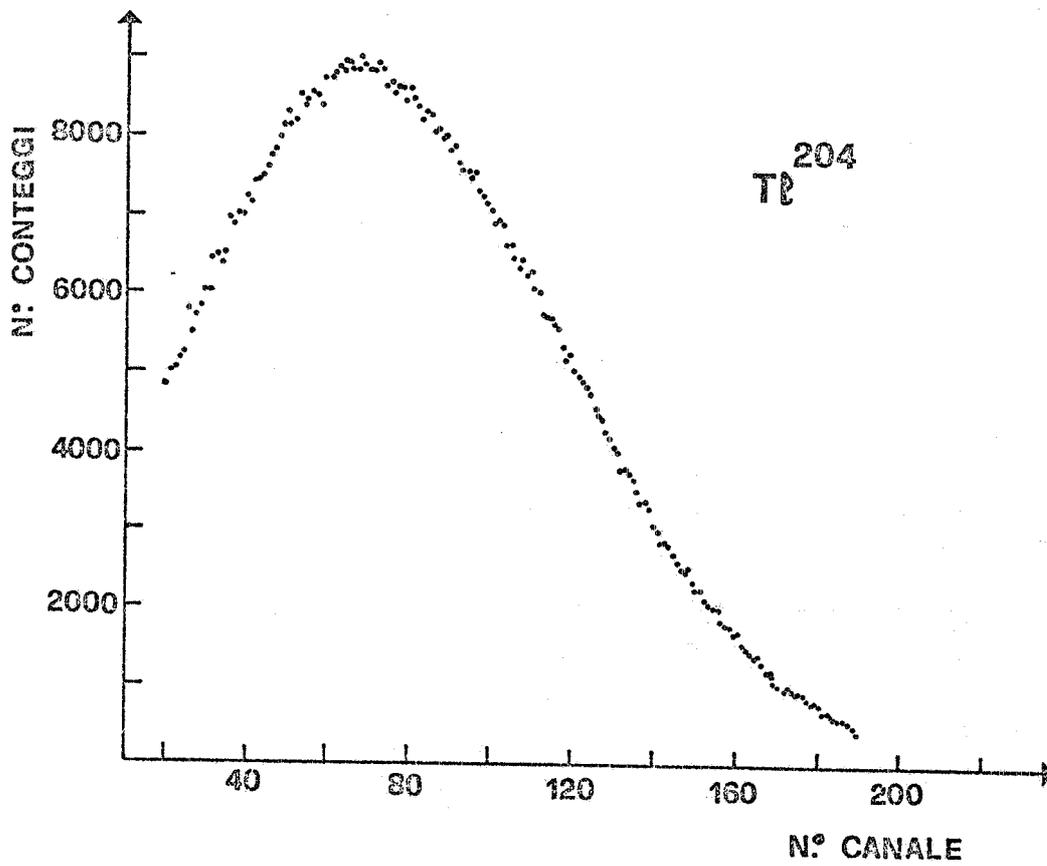


FIG. 7

TABELLA II

Punto	Canale a metà altezza
1	126 + 1
2	126
3	127
4	119
5	114
6	117
7	120
8	114
9	119

4. - CARATTERISTICHE DEL TELESCOPIO. -

Il sistema di conteggio del telescopio è stato realizzato quasi esclusivamente con moduli NIM ottenibili commercialmente.

Lo schema a blocchi dell'apparato è presentato in Figura 8 e mostra insieme sia il sistema di analisi lineare tradizionale lenta degli impulsi dal cristallo NaI(Tl) sia il sistema di analisi lineare veloce mediante taglio dello impulso di fotoanodo.

L'analisi lenta è fatta attraverso il preamplificatore di carica ORTEC 113, l'amplificatore a doppia differenziazione ORTEC 410 e il "linear gate stretcher" ORTEC 442.

L'analisi veloce si ottiene integrando direttamente l'impulso tagliato del fotoanodo mediante il "linear gate stretcher" EGG 105/N. L'impulso nel nostro caso è di 70 nsec alla base. Poichè il range dinamico del "linear gate" per impulsi di questa durata è stretto ($\sim 30\%$), è necessario un riduttore variabile all'ingresso di esso per riportare in range l'altezza degli impulsi da analizzare.

Anche l'analisi lineare degli impulsi del contatore dE/dx viene fatta integrando, mediante il "linear gate stretcher EGG 105/N, l'uscita dei due fotoanodi sommata e amplificata.

Per quanto riguarda la coincidenza, la temporizzazione e discriminazione per gli impulsi del contatore dE/dx è fatta a "leading edge" mediante il discriminatore EGG TR 204 A. Tale metodo di discriminazione è risultato soddisfacente per gli impulsi dallo scintillatore plastico, mentre non lo è per gli impulsi dallo scintillatore NaI(Tl) il cui tempo di salita è lungo rispetto all'analisi temporale che si intende ottenere. Per minimizzare gli effetti di "walk" il miglior metodo di discriminazione e temporizzazione per il contatore E è risultato quello a "constant fraction" ottenuto con il 453 ORTEC sugli impulsi di fotoanodo previamente formati dall'amplificatore 454 ORTEC, utilizzato a tempi di integrazione e differenziazione molto bassi ($5 \div 10$ nsec). La risoluzione temporale del telescopio ottenuta è stata misurata direttamente sul fascio di protoni del Ciclotrone di Milano usando un convertitore tempo-ampiezza (TAC ORTEC 447). Il risultato è mostrato in Fig. 9 ed è di $\sim 2,5$ nsec. alla base.

L'uscita della coincidenza veloce (EGG C 304/N) abilita i

formatori di impulso di gate la cui durata è stata fissata nel nostro caso a ~ 50 nsec per il ramo dE/dx (EGG TR 204 A) e ~ 100 nsec per il ramo E veloce (ORTEC 417, formazione a cavo).

La messa a punto del telescopio è stata realizzata preliminarmente mediante una sorgente di Co^{60} . La Figura 10 mostra lo spettro di Cobalto che si ottiene con l'analisi lineare veloce e la forte perdita di risoluzione come previsto.

La taratura energetica del telescopio, i test di risoluzione energetica per i protoni e di risoluzione temporale della coincidenza sono stati fatti utilizzando il fascio di protoni del Ciclotrone dell'Università di Milano, di energia incidente 44.8 MeV, diffusi elasticamente e anelásticamente a 120° da una targhetta di 3 mg/cm^2 di polietilene. Nelle Figure 11 e 12 sono mostrati gli spettri ottenuti rispettivamente con la analisi lenta e l'analisi veloce. Le energie riportate nelle figure sono l'energia totale dei protoni che incidono sul telescopio (in parentesi) e l'energia che perdono nel contatore E. Dal confronto tra le due figure appare evidente che il sistema di analisi veloce, mediante taglio dello impulso dal fototubo, non peggiora la risoluzione energetica dei protoni almeno a partire dalle energie analizzate. Infatti la larghezza del picco elastico è in entrambi i casi di 1.4 MeV.

La risoluzione energetica del telescopio non è direttamente misurabile sugli spettri energetici riportati. Infatti alla larghezza dei picchi su tali spettri contribuiscono oltre alla risoluzione del telescopio i seguenti fattori:

- l'indeterminazione energetica del fascio di protoni (0.5 MeV per i protoni utilizzati);
- l'indeterminazione dell'angolo di diffusione;
- la variazione degli spessori di targhetta di polietilene e di scintillatore plastico attraversati;
- lo "straggling" dei protoni nei vari materiali escluso il plastico (questo ultimo effetto contribuisce alla indeterminazione energetica intrinseca del telescopio).

La risoluzione energetica del telescopio si può ricavare a partire dagli spettri riportati sottraendo il contributo facilmente calcolabile degli effetti detti. Essa risulta di 2.5% per i protoni di 34.8 MeV.

5.- CONCLUSIONI. -

I test eseguiti sul prototipo di telescopio E dE/dx ci permettono di concludere che:

- a) è possibile fare una analisi lineare veloce di impulsi di

12.

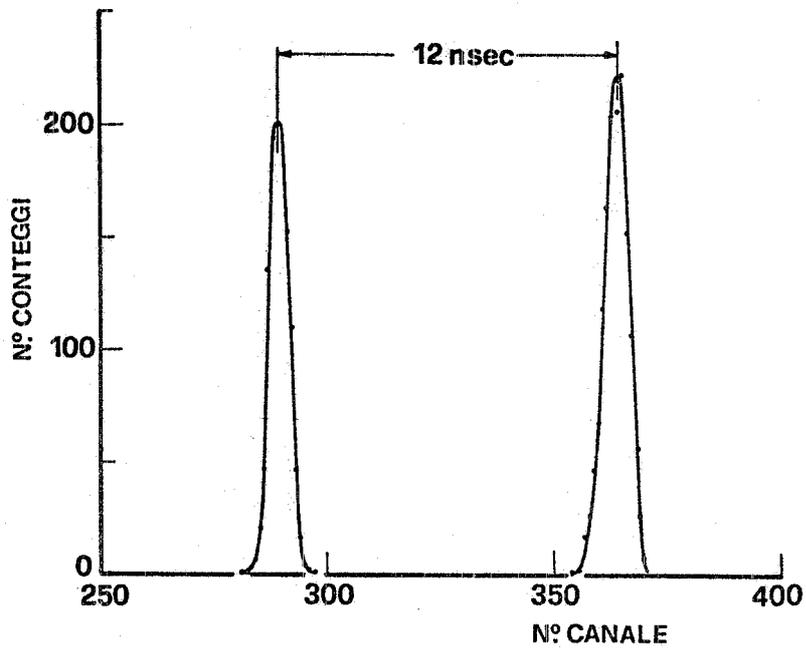


FIG. 9

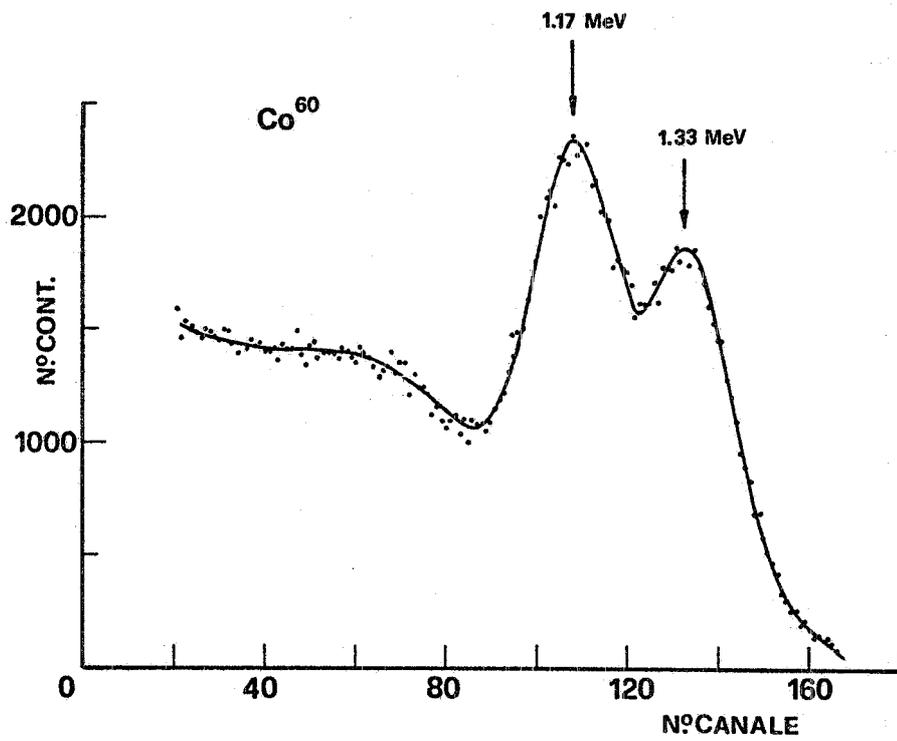


FIG. 10

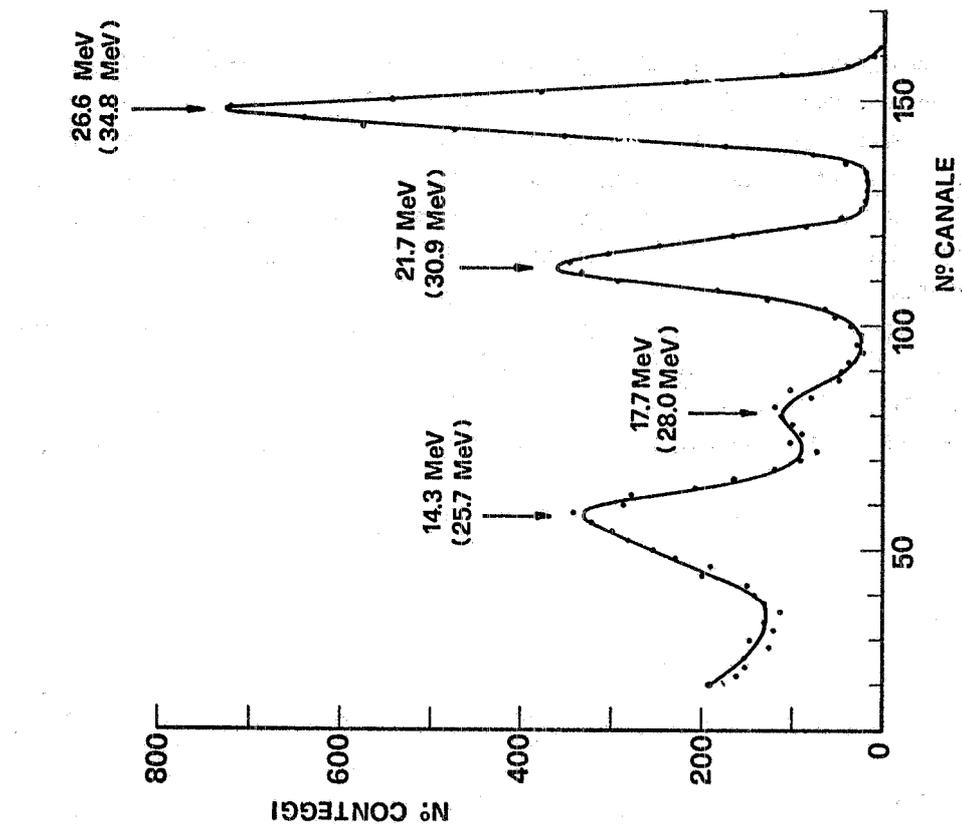


FIG. 11

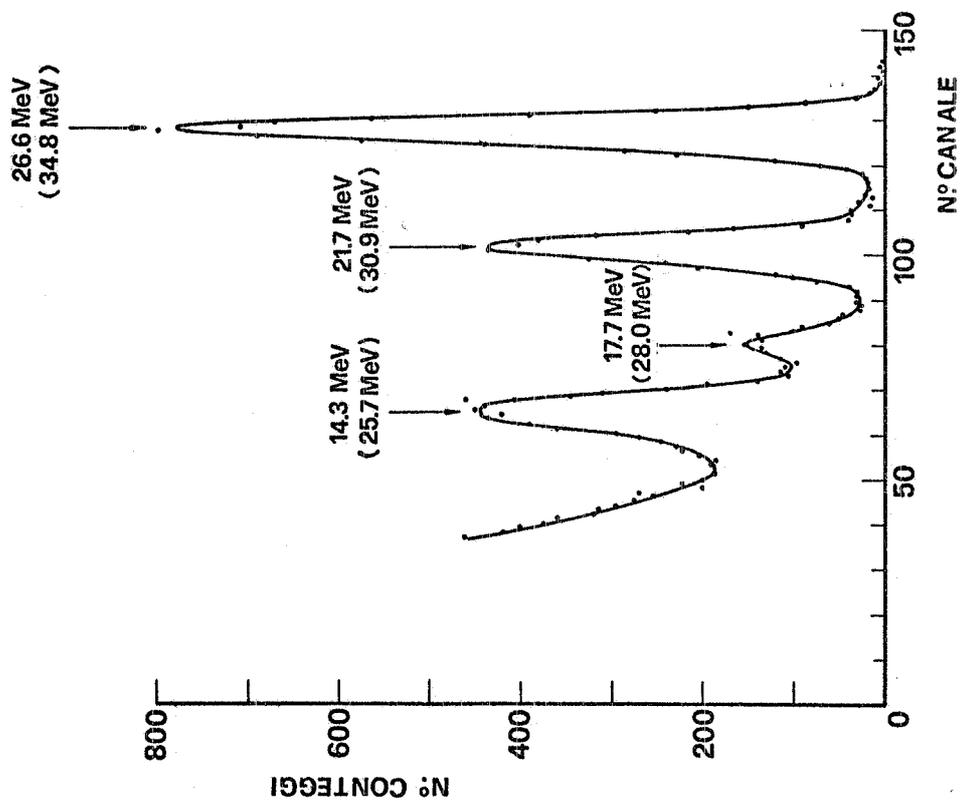


FIG. 12

14.

protoni in uno scintillatore NaI(Tl) senza perdita apprezzabile di risoluzione, almeno per taglio degli impulsi non inferiore a 70 nsec.

b) Tale taglio rende l'analisi lineare confrontabile temporalmente con quella di uno scintillatore plastico (fattore 3÷4) e quindi anche i problemi di impilamento risultano confrontabili, mentre la indeterminazione energetica con l'NaI(Tl) rimane inferiore di un fattore almeno 2 rispetto al plastico.

c) Appare possibile raggiungere una risoluzione energetica del 2% con un telescopio del tipo descritto, selezionando in omogeneità di fotocatodo il fototubo del contatore E e migliorando la raccolta di luce dello stesso, ad esempio con montaggio tipo "integral line".

BIBLIOGRAFIA. -

- (1) - G. P. Capitani, E. De Sanctis, S. Faini, C. Guaraldo, R. Malvano, G. Ricco, M. Sanzone e R. Scrimaglio, Frascati Report LNF-72/99 (1972).
- (2) - C. Brassard, Nuclear Instr. and Meth. 94, 301 (1971).
- (3) - A. Zucchiatti, Tesi.