

COMITATO NAZIONALE PER L'ENERGIA NUCLEARE  
Laboratori Nazionali di Frascati

LNF - 69/8  
28 Gennaio 1969

U. Bizzarri e T. Letardi: I CANALI DI TRASPORTO DEL  
FASCIO ESTRATTO DELL'ELETTROSINCROTRONE DI  
FRASCATI. -

Nota Interna: n. 431  
28 Gennaio 1969

U. Bizzarri e T. Letardi: I CANALI DI TRASPORTO DEL FASCIO  
ESTRATTO DELL'ELETTROSINCROTRONE DI FRASCATI.

1) - PRODUZIONE DEL FASCIO ESTERNO DI ELETTRONI -

Il metodo seguito sull'elettrosincrotrone di Frascati per ottenere l'estrazione del fascio di elettroni consiste nell'eccitare la risonanza delle oscillazioni radiali di betatrone.

Ciò si ottiene introducendo ai bordi del magnete<sup>(1)</sup> principale opportuni campi magnetici localizzati.

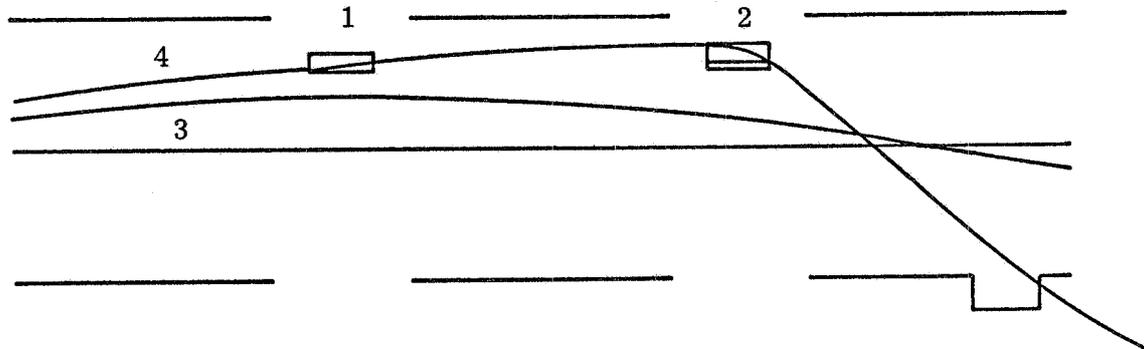
Gli elettroni che, alla fine del ciclo d'accelerazione, vengono fatti spiralizzare verso orbite più interne, incontrando i suddetti campi localizzati incominciano giro per giro ad accrescere in modo coerente l'ampiezza delle oscillazioni radiali. Con tale meccanismo gli elettroni riescono a scavalcare il setto di un primo magnete (magnete estrattore  $M_1$ ) in cui subiscono una prima deviazione. Questa prima deviazione porta il fascio in un secondo magnete (magnete estrattore  $M_2$ ) nel quale subisce una deviazione tale da uscire definitivamente dal campo del sincrotrone (v. Fig. 1)<sup>(x)</sup>. I magneti  $M_1$  ed  $M_2$  sono

---

(x) - Il magnete  $M_1$  ha pure la funzione di eccitare la risonanza delle oscillazioni radiali di betatrone mediante il suo campo disperso che ha l'andamento tipico di quello prodotto da una lamina di corrente.

2.

pulsati rispettivamente con correnti massime di 600 e 3500 Ampere (corrispondenti all'energia di 1000 MeV).



- 1 - Magnete estrattore  $M_1$
- 2 - Magnete estrattore  $M_2$
- 3 - Traiettorie di un elettrone non perturbato
- 4 - Traiettorie di un elettrone estratto.

FIG. 1

La durata utile degli impulsi di corrente (costante entro 1%) è di circa 1,5 msec, e tale è quindi la durata massima dell'impulso del fascio estratto.

## 2) - CARATTERISTICHE DEL FASCIO ESTRATTO.

### 2.1. - Durata dello spill out.

Per il fascio gamma lo spill out è controllato dal tempo di discesa della radiofrequenza al termine del ciclo di accelerazione, e può essere variato da 50  $\mu$ sec a 5 msec. Per il fascio esterno un limite superiore allo spill out è dato dalla durata dell'impulso di corrente nei magneti estrattori, e presentemente non può superare 1,5 msec.

### 2.2. - Dispersione in energia.

Alla dispersione in energia degli elettroni del fascio estratto contribuiscono due fattori: prima di tutto, considerando tutti gli elettroni circolanti nella macchina ad un dato istante, essi non sono monoenergetici ma hanno uno spread dovuto alle perdite di energia per irraggiamento. Tale contributo è al massimo dell'1% circa. In secondo luogo, se si considerano gli elettroni ad istanti successivi del ciclo di accelerazione, essi hanno energia differente e proporzionale al campo magnetico istantaneo. Poichè dal punto di vista sperimentale, se non si utilizzano particolari tecniche, si integra su tutta la durata dell'impulso del fascio, questo si comporta come se a-

vesse uno spread d'energia

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{\pi^2}{4} \left( \frac{\Delta t}{T} \right)^2$$

essendo  $T = 50$  msec il periodo del campo magnetico e  $\Delta t$  la durata di spill-out (supponendo naturalmente lo spill-out centrato sul massimo del campo magnetico).

Nelle condizioni normali si lavora con una durata di circa 1 msec: in tali condizioni lo spread di energia dovuto al campo risulta circa l'1‰.

### 2.3. - Emittanza del fascio e posizione apparente della sorgente.

Per determinare i parametri del canale di trasporto del fascio estratto, è necessario determinare le posizioni delle sorgenti e le emittanze, sia orizzontale che verticale, del fascio.

Ciò si può effettuare semplicemente foccheggiando il fascio con un quadrupolo, successivamente sui due piani. Dalle caratteristiche del quadrupolo e dalla distanza del piano immagine si risale alla posizione e alla estensione delle sorgenti.

Aggiungendo alle precedenti la misura delle dimensioni del fascio all'altezza del quadrupolo, si può facilmente ricavare il valore delle due emittanze(2).

Nella Fig. 2 è rappresentata la disposizione sperimentale, mentre nella Fig. 3 sono riportate le foto del fascio fatte sul piano

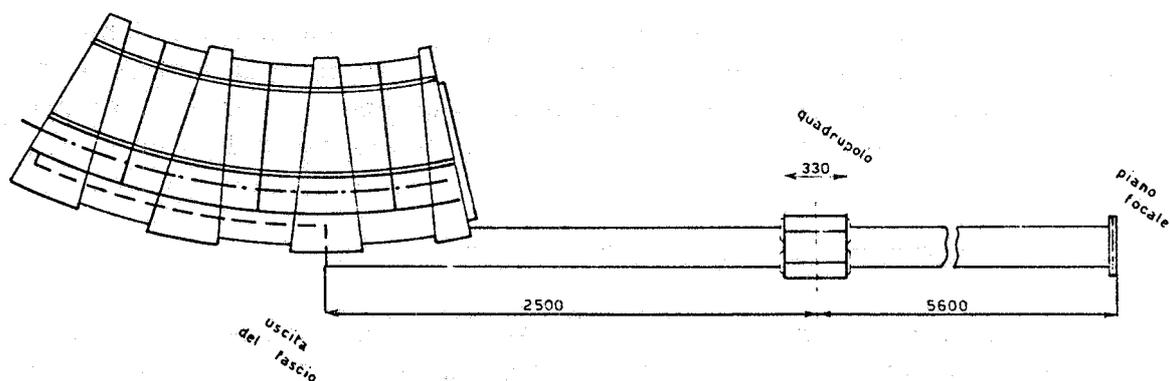


FIG. 2

focale rispettivamente nel caso di foccheggiamento orizzontale e verticale.

4.

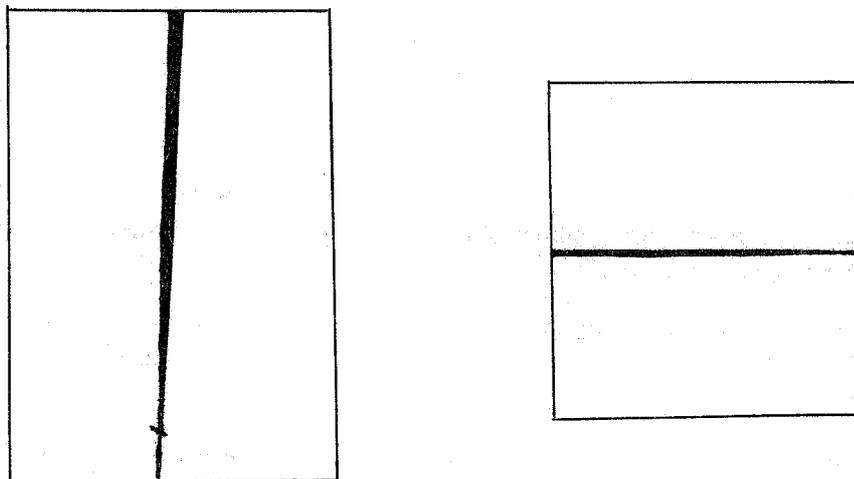


FIG. 3

Dalle misure seguono i seguenti valori:

- sorgente orizzontale	è posta	50	cm	prima della finestra d'uscita.
- semidimensione orizzontale		0,76	mm	
- semidivergenza max orizzontale		26	mrad	
- sorgente verticale	è posta	56	cm	prima della finestra
- semidimensione verticale		0,8	mm	
- semidivergenza verticale		4,8	mrad	
- emittanza orizzontale		$\pi \times 2$	cm x mrad	
- emittanza verticale		$\pi \times 0,4$	cm x mrad	

Si è trovato inoltre che tali grandezze sono praticamente costanti con l'energia. Ciò ha permesso di realizzare un canale di trasporto capace di focheggiare il fascio a qualunque energia, semplicemente scalando i campi magnetici in ogni elemento del canale.

### 3) - PROGETTO DEI CANALI DI TRASPORTO -

Il progetto di un canale di trasporto per particelle cariche si presenta di norma con un certo numero di parametri caratteristici del fascio, con un certo numero di richieste per le caratteristiche finali del fascio (posizione, divergenza, dimensione, cromatismo, etc) e con una geometria per il percorso del fascio quasi sempre prestabilita. Il progetto consiste ovviamente nella scelta del numero degli elementi magnetici, della loro posizione e delle loro caratteristiche (che debbono essere fisicamente realizzabili).

In generale però è molto difficile e, del resto, poco conveniente impostare un calcolo che consenta di ottenere il minimo numero di elementi, e loro caratteristiche, necessari alla realizzazione del canale voluto. Pertanto la via che si segue in pratica è quella di stabilire a priori, seguendo considerazioni semplici ed intuitive, una struttura provvisoria del canale. Successivamente, mediante calcolo numerico, si studiano le caratteristiche di tale canale, apportando le opportune modifiche fino ad ottenere le caratteristiche volute.

Sono stati realizzati successivamente tre canali di trasporto del fascio di elettroni, la cui sistemazione è riportata nella Fig. 4. Il canale relativo all'esperimento di bremsstrahlung a grande angolo (N1), quello con due punti targhetta relativi rispettivamente agli esperimenti di elettroproduzione del  $\pi^0$  ed elettrodisintegrazione del deuterio (N. 2), e quello relativo all'esperimento (e, e', p) (N. 3).

L'elaborazione dei parametri dell'ottica di trasporto, per ottenere le caratteristiche specifiche del fascio sui bersagli, è stato effettuato con un programma già esistente per un calcolatore IBM 7090<sup>(3)</sup>. Un altro programma<sup>(4)</sup> ha permesso di valutare l'influenza degli errori dei diversi parametri del canale (errori di allineamento e stabilità delle alimentazioni) sulle caratteristiche finali del fascio. La scelta degli elementi dell'ottica è stata fatta tenendo largamente presente la disponibilità dei laboratori, per non dover ricorrere alla costruzione ex novo di tutti i quadrupoli e magneti deflettori.

#### CANALE N. 1 -

Il canale n. 1 trasporta il fascio fino ad una targhetta posta a m. 24,6 dalla finestra di uscita, su un'area sperimentale rialzata di 70 cm dal piano del sincrotrone; le caratteristiche del fascio sulla targhetta sono:

semidimensione orizzontale	4 mm
semidivergenza "	5 mrad
semidimensione verticale	2 mm
semidivergenza verticale	3 mrad

Il sistema di trasporto è stato realizzato con quattro quadrupoli e due magneti deflettori (v. Fig. 5). Nella Fig. 6 è riportato anche l'inviluppo del fascio.

In orizzontale esiste un fuoco all'altezza del secondo deflettore verticale (DV2), mentre in verticale il fascio corre quasi parallelo. Un piccolo indice di campo ( $n = 1$ ) sui magneti deflettori ha permesso di mantenere limitati i coefficienti di aberrazione cromatica del 1° ordine. Infatti, come è noto, il cromatismo di un canale si può definire, chiamando  $\Delta y$  e  $\Delta y'$  le variazioni in posizione e in angolo

6.

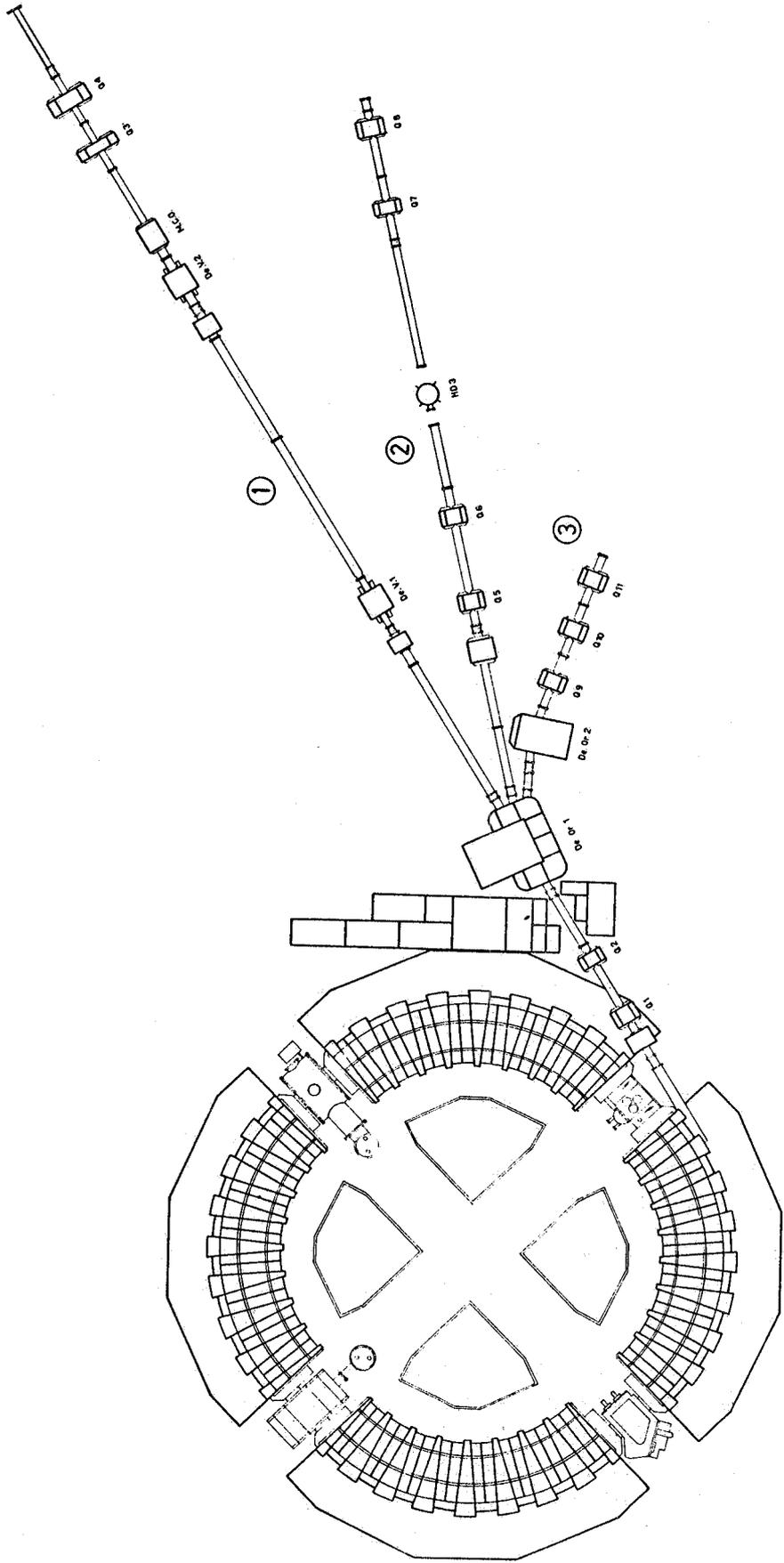


FIG. 4

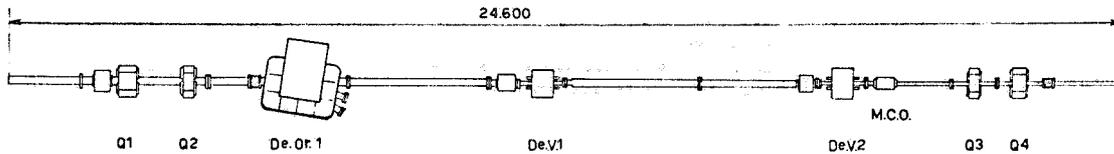


FIG. 5

di una particella avente variazione  $\Delta p/p$  di momento,

$$\Delta y = \alpha_{13} \frac{\Delta p}{p} ; \quad \Delta y' = \alpha_{23} \frac{\Delta p}{p}$$

essendo  $\alpha_{ik}$  i coefficienti della matrice di trasferimento del sistema ottico.

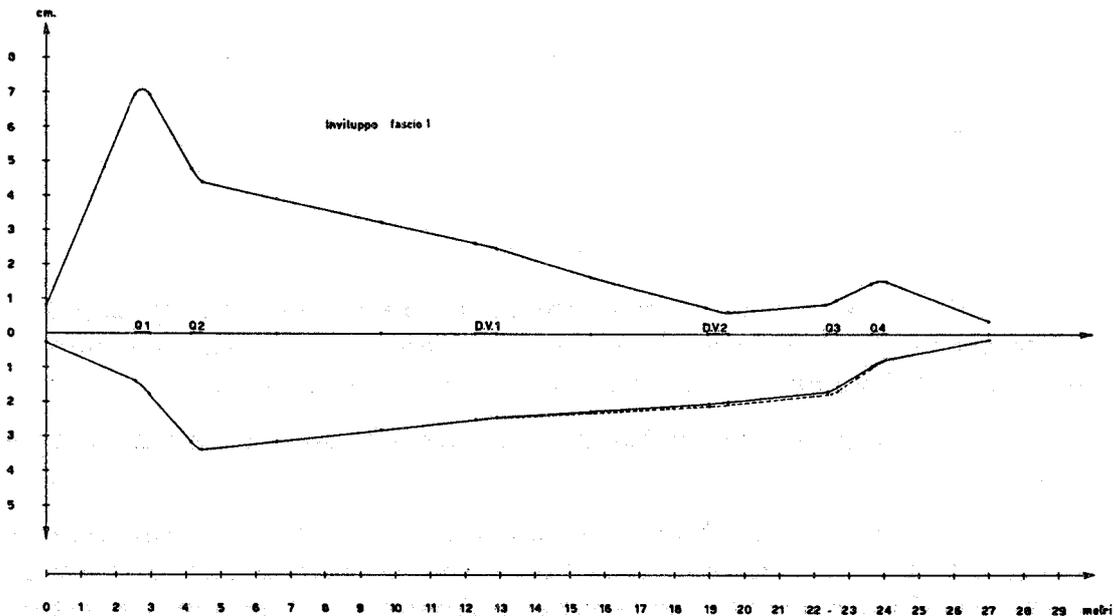


FIG. 6

Nel caso del nostro sistema di trasporto risulta per il piano verticale

$$\alpha_{13} = 0,2 \text{ metri}; \quad \alpha_{23} = 4 \times 10^{-2} \text{ rad}$$

Il calcolo dettagliato di alcune traiettorie (v. Fig. 7) ha mostrato che il gradiente del primo quadrupolo deve mantenersi costante entro l'1% per non introdurre sensibili aberrazioni.

Ciò ha imposto l'uso di un collimatore con apertura di 12 cm, come suggerito da misure di gradiente. Tale collimatore ha però comportato una perdita di intensità di circa il 20%.

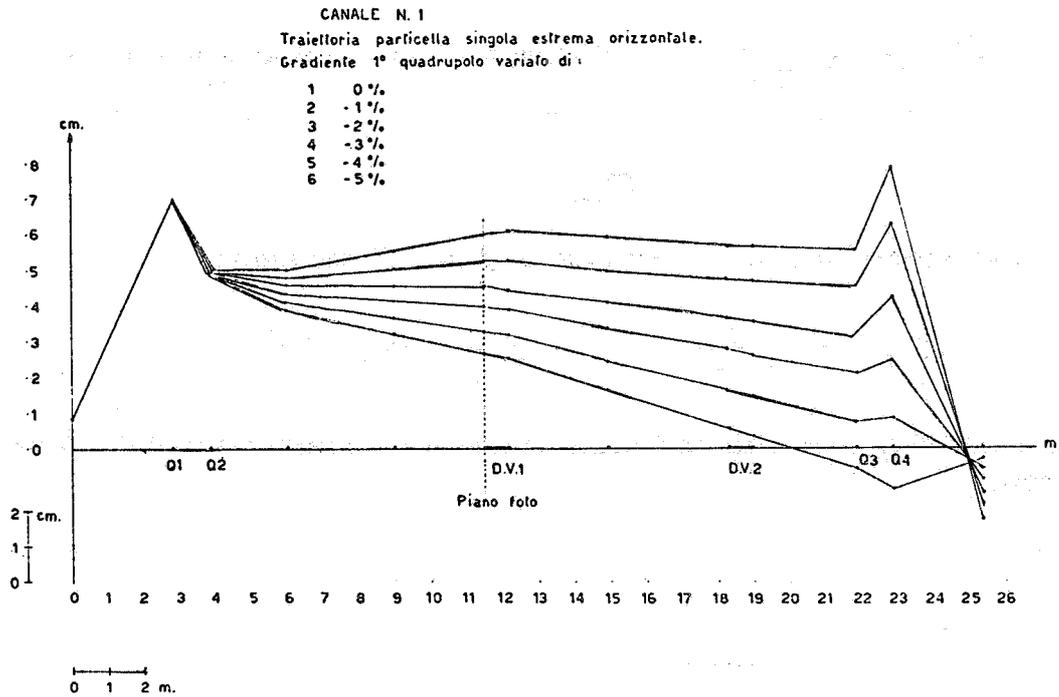


FIG. 7

Piccoli aggiustamenti verticali sul bersaglio, sia in angolo che in posizione, vengono effettuati regolando le correnti nei due magneti che realizzano la pian parallela verticale di 70 cm.

Tali magneti sono alimentati in serie e sono opportunamente shuntati.

In pratica è risultato utile disporre di altri due parametri per gli aggiustamenti orizzontali. A tale scopo è stato aggiunto un piccolo magnete deflettore (MCO) ed è stato utilizzato un magnete deflettore già usato su un altro canale.

#### CANALE N. 2 -

In tale canale è stato previsto l'inserimento di due bersagli: mediante i quadrupoli  $Q_1$   $Q_2$   $Q_5$   $Q_6$  e il magnete OR 1 (che deflette di  $19^\circ$ ) il fascio può essere diretto e foceggiato sul primo bersaglio; per foceggiarlo sul secondo bersaglio, si devono accendere anche i quadrupoli  $Q_7$  e  $Q_8$ . Anzichè rifoceggiare il fascio semplicemente con  $Q_7$  e  $Q_8$ , si è preferito variare anche i gradienti dei quadrupoli precedenti, per ottenere valori medi dei gradienti più bassi. Si tratta, quindi, di due canali (v. Fig. 8) i cui involucri sono riportati nel

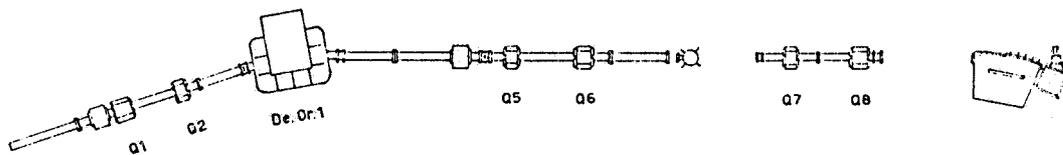


FIG. 8

le figg. 9 e 10.

I coefficienti di cromatismo sono: per il fuoco sul 1° bersaglio

$$\alpha_{13} = - 0.79 \text{ m}; \quad \alpha_{23} = - 1.4 \text{ rad}$$

per il fuoco sul 2° bersaglio

$$\alpha_{13} = - 0.64 \text{ m} \quad \alpha_{23} = 2.7 \text{ rad}$$

Anche in questo canale è stato inserito un piccolo deflettore che permette di ottenere piccoli spostamenti orizzontali sui bersagli.

### CANALE N. 3 -

In questo canale il fascio subisce due grandi deflessioni (34° e 18°), e ciò al fine di utilizzare al massimo l'area sperimentale.

I due magneti OR1 ed OR2 possono effettuare tali deflessioni per un'energia massima del fascio di 630 MeV; nel progettare l'ottica si è imposto un fuoco fra i due magneti deflettori, onde avere un fascio di dimensioni trasverse piccole nei due deflettori, per minimizzare gli effetti delle irregolarità di campo che si hanno nei magneti in tali condizioni di lavoro così prossime alla saturazione.

I coefficienti di aberrazione cromatica sono

$$\alpha_{13} = - 0.44 \text{ m} \quad \alpha_{23} = - 0.8 \text{ rad}$$

In Fig. 11 è mostrata la pianta del canale, e in Fig. 12 l'involuppo del fascio.

### CARATTERISTICHE E MISURE SUGLI ELEMENTI DELL'OTTICA -

Per ogni quadrupolo sono state fatte le seguenti misure:

- a) Curva di eccitazione
- b) Lunghezza magnetica equivalente

10.

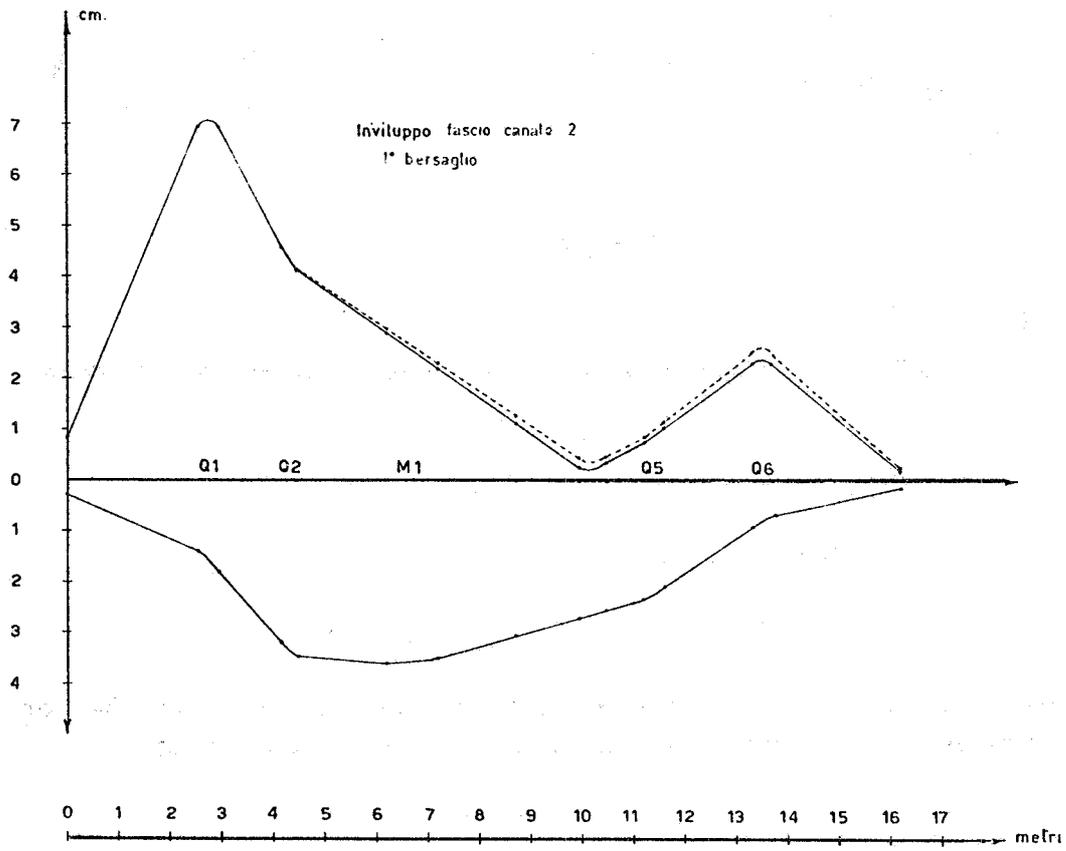


FIG. 9

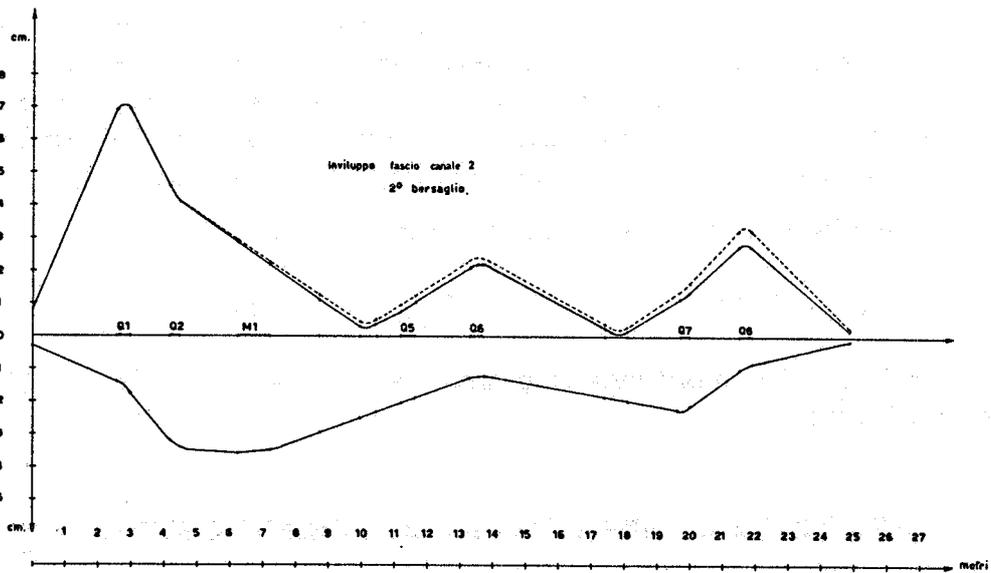


FIG. 10

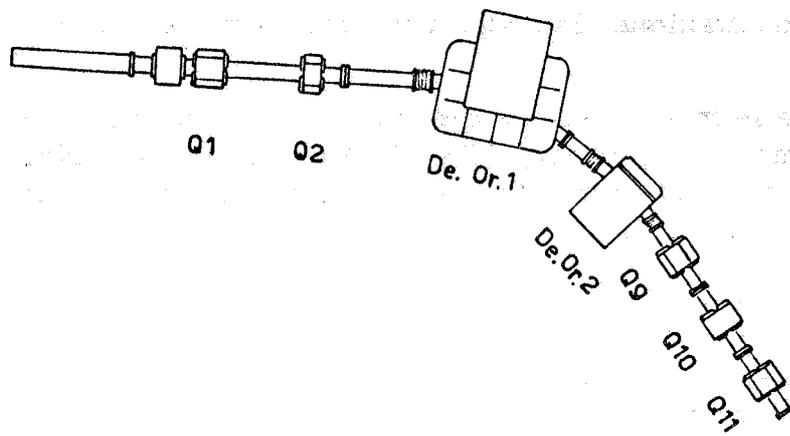


FIG. 11

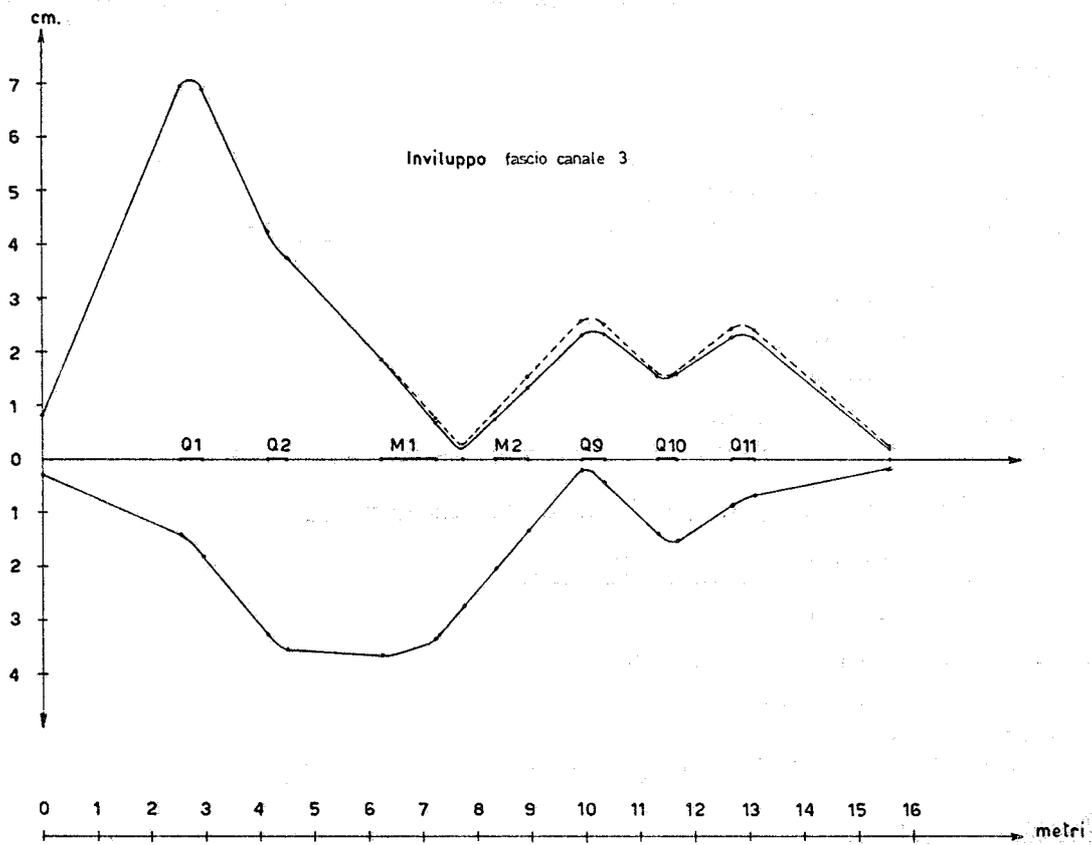


FIG. 12

12.

c) Uniformità del gradiente.

Per i magneti deflettori, analogamente, sono state misurate le curve di eccitazione, la lunghezza equivalente e l'uniformità del campo.

Tutte le misure sono state eseguite con la tecnica descritta nella nota interna: G. Sanna, LNF-63/82. La catena bobina-flussometro - Voltmetro è stato tarato con il campo magnetico di una bobina di Helmotz, noto all'1‰.

Quadrupolo N. 1.

Diametro gola cm 16

Lunghezza geometrica cm 33

Lunghezza magnetica cm 39,6

Pendenza iniziale del gradiente gauss/cm/Amp. = 1.98 (v. Fig. 13)

Quadrupolo N. 2.

Diametro gola cm 16

Lunghezza geometrica cm 22

Lunghezza magnetica cm 28,6

Pendenza iniziale del gradiente gauss/cm/Amp. = 1.98 (v. Fig. 13)

Quadrupolo N. 3.

Diametro gola cm 10

Lunghezza geometrica cm 20

Lunghezza magnetica cm 25

Pendenza iniziale gauss/cm/Amp = 8.69 (v. Fig. 14)

Quadrupolo N. 4.

Diametro gola cm 10

Lunghezza geometrica cm 34

Lunghezza magnetica cm 39

Pendenza iniziale gauss/cm/Amp = 8.69 (v. Fig. 14)

Quadrupoli 5, 6, 7, 8, 9, 11 come quadrupolo 1.

Magnet deflettori D.V. 1. e D.V. 2.

Altezza gap cm 10

Lunghezza geometrica cm 50

Lunghezza magnetica cm 60

Indice di campo  $n = 1$

Pendenza iniziale gauss/Amp = 20.1 (v. Fig. 15)

Magnete O.R. 1.

Altezza gap cm 14

Larghezza gap cm 40

Lunghezza geometrica cm 90

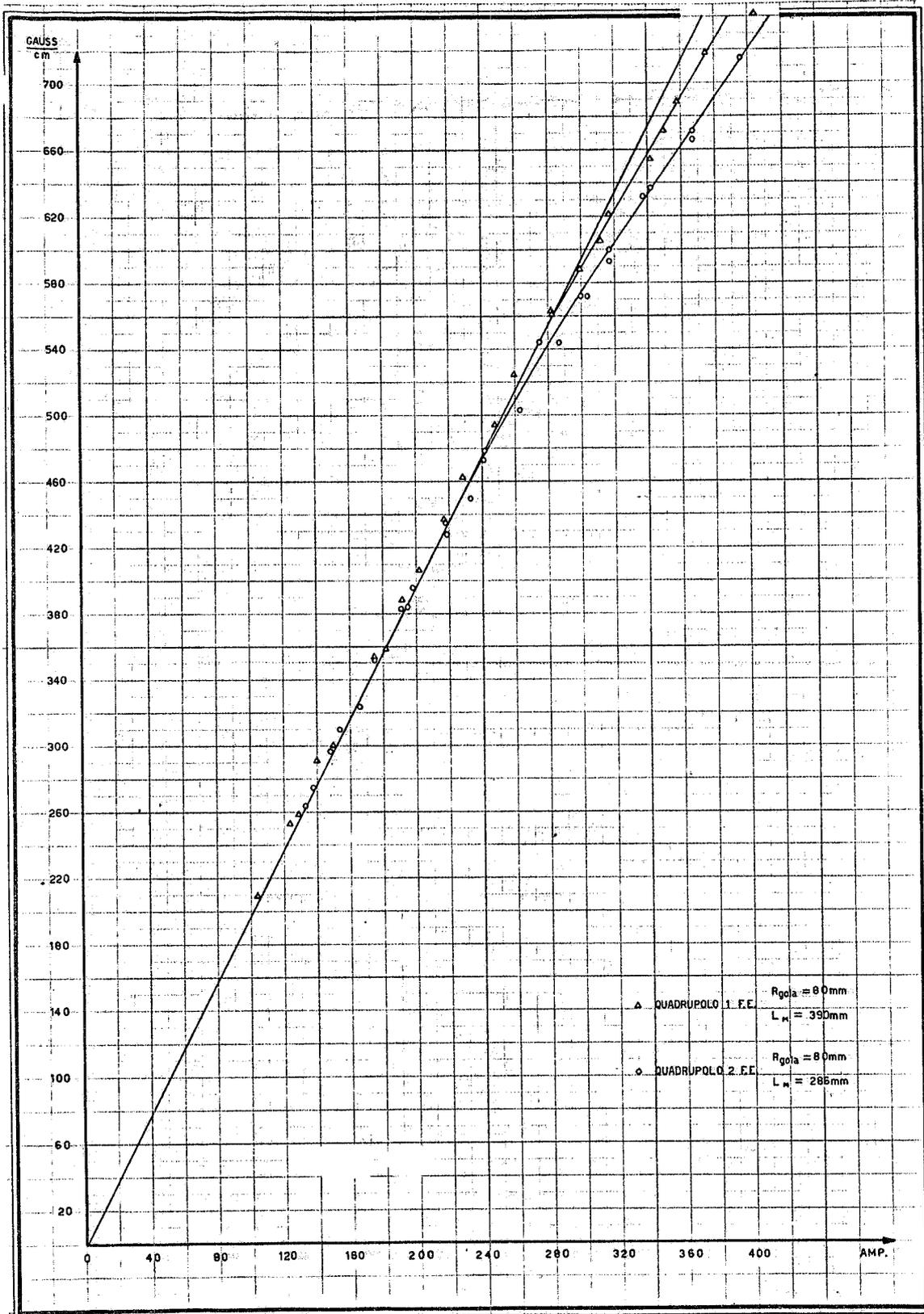


FIG. 13

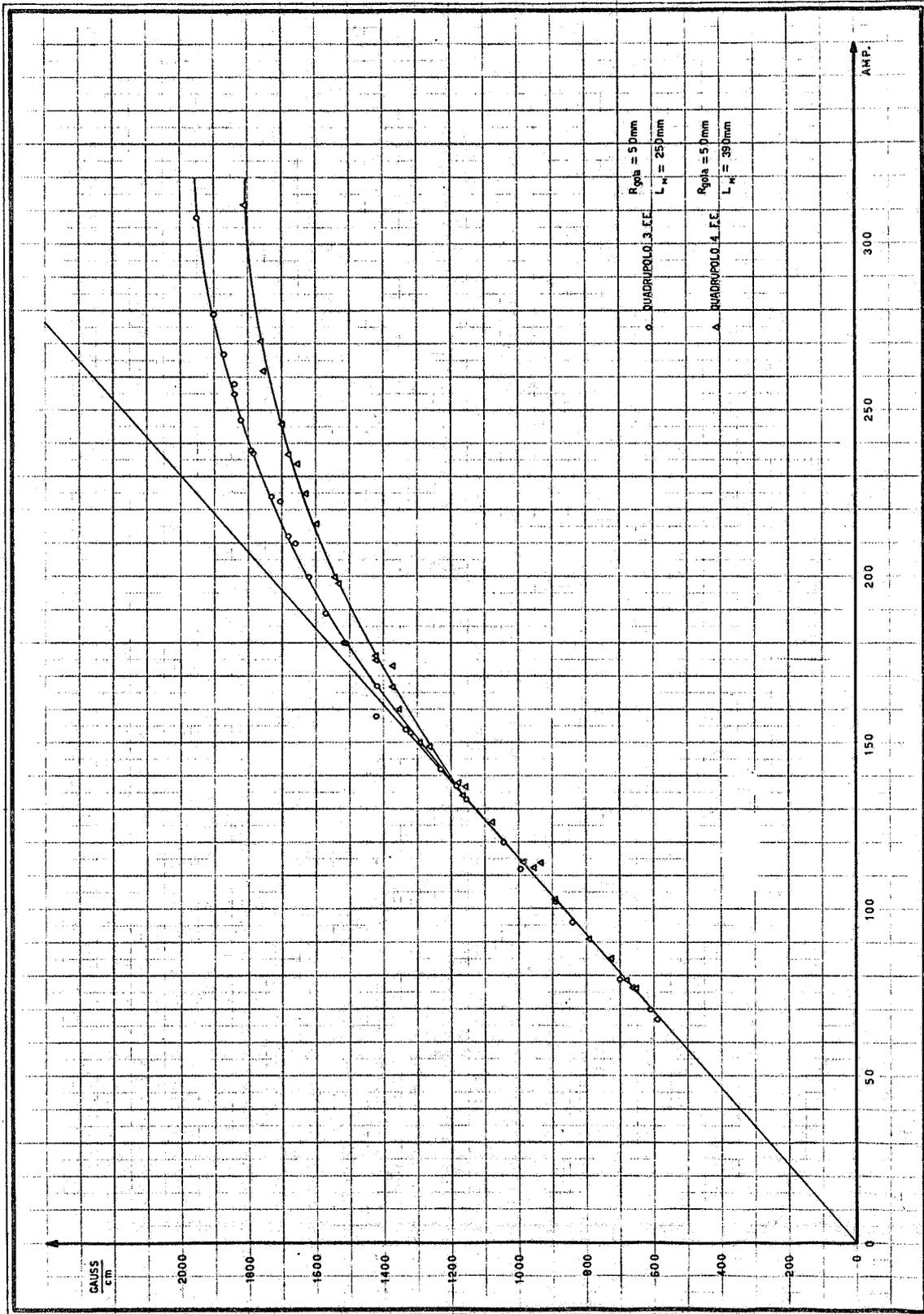


FIG. 14

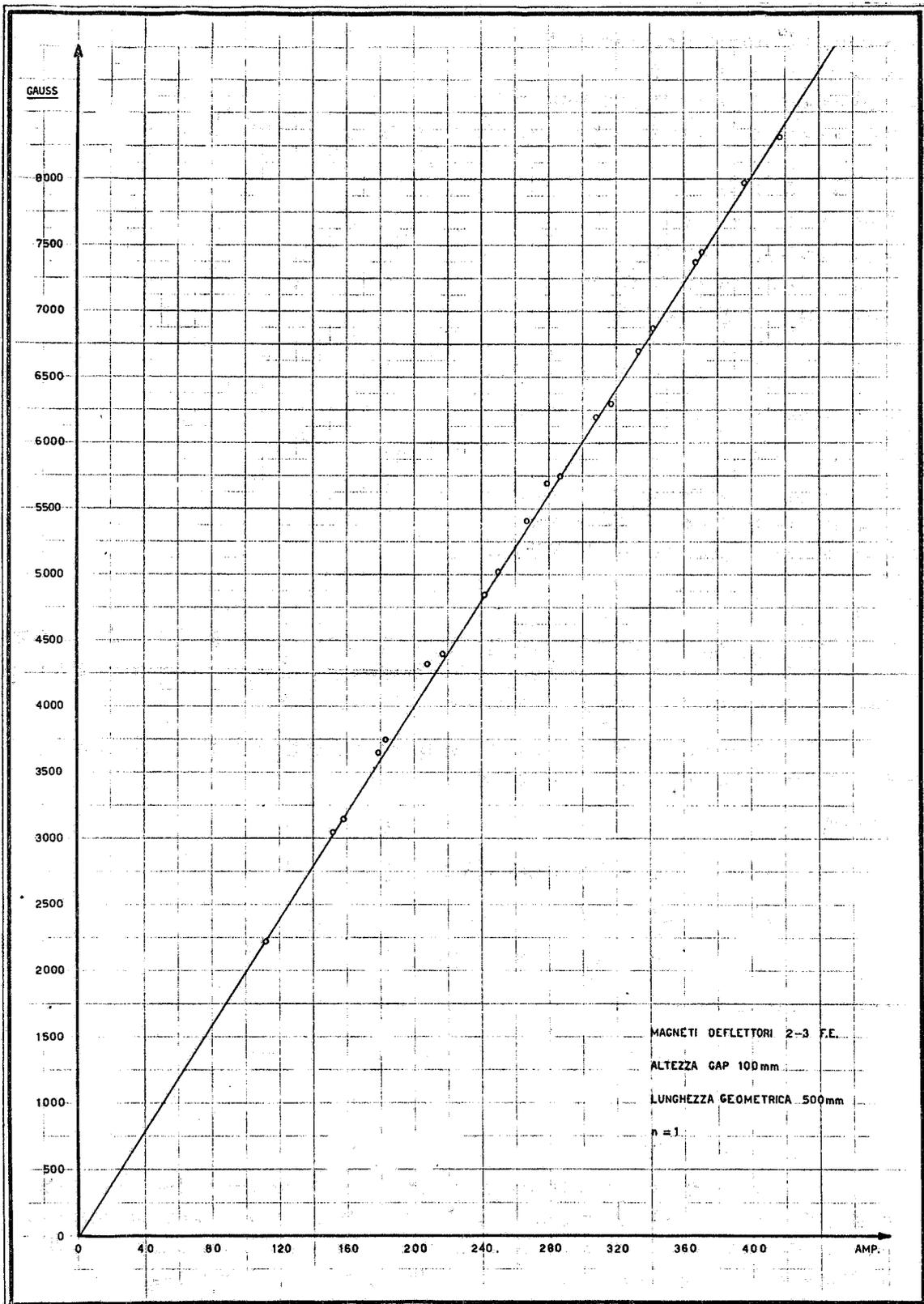


FIG. 15

16.

Lunghezza magnetica cm 106

Indice di campo  $n = 0$

Pendenza iniziale 28,6 gauss/Amp.

(Per notizie più dettagliate, v. R. Toschi, LNF-60/2).

#### Magnete O. R. 2.

Altezza gap 14 cm

Larghezza gap 30 cm

Lunghezza geometrica 40 cm

Lunghezza magnetica 55 cm

Indice di campo  $n = 0$

Pendenza iniziale 38,0 gauss/Amp.

#### Quadrupolo N. 10

Diametro gola 10 cm

Lunghezza geometrica 30 cm

Lunghezza magnetica 34,3 cm

Pendenza iniziale 15gauss/cm/Amp

#### Alimentazioni

Le alimentazioni sono fatte con gruppi ruotanti, da 250 KW (D2 e D3) stabilizzati in corrente, entro  $\pm 1\%$  da 50 KW (D5, D6, D9, D10) stabilizzati in corrente, e da gruppi statici (R2, R3).

Nello specchietto successivo sono riportati i vari elementi, e a fianco le alimentazioni relative:

Quadrupoli:	Q1 - D5	Q5 - R3	Q9 - D10
	Q2 - D6	Q6 - D2	Q10 - R3
	Q3 - R3	Q7 - D10	Q11 - D9
	Q4 - R2	Q8 - D9	

Magneti deflettori:

DU1, DU2 (in serie) - D3

OR1 - D3

OR2 - D2

Le correnti degli elementi magnetici vengono misurate con resistenze tarate (shunt classe 0,1) e con trasduttori magnetici e i segnali vengono portati in sala controllo. Un selettore permette di scegliere la corrente che si vuol controllare, e si può leggere sia con un digital, per letture dai trasduttori e dagli shunt, sia con un ponte Leeds-Northup, per letture dagli shunt.

## REALIZZAZIONE MECCANICA -

Il trasporto degli elettroni è fatto sotto vuoto, che però è disconnesso dal vuoto principale del sincrotrone; esattamente, gli elettroni uscendo dal sincrotrone incontrano dapprima una flangia di mylar + acciaio di spessore (0,075 mm di mylar, 0,05 mm di acciaio) in di a 5 cm di aria, un'altra flangia di mylar di spessore 0,125 mm. Nel canale il vuoto è mantenuto ad un valore di  $\sim 10^{-3}$  mm Hg mediante una pompa rotativa ad olio di portata 60 m<sup>3</sup>. h. situata presso il magnete deflettore O. R. 1. Il vuoto è letto da una termocroce sistemata vicino alla scatola dei telecollimatori cioè all'inizio del canale. Lo strumento di lettura è sistemato nel rack di estrazione fascio.

I tubi, in ottone, hanno un diametro di 150 mm, esclusa l'ultima parte del canale N. 1, che è fatta con tubi da 100 mm di diametro (dal secondo deflettore verticale alla targhetta).

Le flange di uscita del fascio sono fatte in mylar di spessore 0,125 mm.

Poichè sono stati osservati dei danneggiamenti da radiazioni sulle flangie di mylar, è stato deciso di cambiarle periodicamente ed esattamente: ogni 300 ore di fascio (prima dell'innalzamento di intensità).

Vari collimatori sono disposti lungo il canale: prima del quadrupolo Q. 1. è stata posta una scatola con quattro collimatori di piombo, due in orizzontale e due in verticale, di spessore 5 cm telecomandabili dalla saletta di estrazione fascio con movimenti indipendenti per ogni collimatore.

La massima apertura in verticale è di 5 cm, e in orizzontale è di 14 cm.

Gli altri collimatori tutti in piombo, sono così disposti; un collimatore cilindrico, lunghezza 5 cm, diametro interno 12 cm nella gola del primo quadrupolo, che ne limita l'apertura alla zona di campo effettivamente utilizzabile.

Un collimatore cilindrico, lunghezza 5 cm diametro interno 6 cm prima del magnete deflettore O. R. 1.

Due collimatori, lunghezza 10 cm in orizzontale, indipendenti e comandabili a mano prima del secondo magnete deflettore verticale D. U. 2.

Idem prima del magnete deflettore orizzontale O. R. 2.

## MISURE DI PROFILO DEL FASCIO -

Per misurare la distribuzione di elettroni nel fascio è stata utilizzata una particolare tecnica fotografica, che permette di evitare uno degli inconvenienti maggiori di tale sistema, cioè la necessità di accurate tarature della lastra fotografica usata.

Con tale metodo<sup>(x)</sup> la lastra viene utilizzata solo come strumento di zero: infatti, vengono fatte varie esposizioni, ad intensità crescenti secondo un ben noto rapporto; una volta sviluppata la lastra, vengono messe in luce solo le linee che hanno la stessa densità; queste linee di isodensità vengono poi sovrapposte di nuovo e fotografate assieme: si ricava così un'unica fotografia, del tipo mostrato nella fig. 16, che è il risultato di una misura eseguita sul fascio 2, primo bersaglio, ed è ingrandita di 4 volte rispetto alle dimensioni reali.

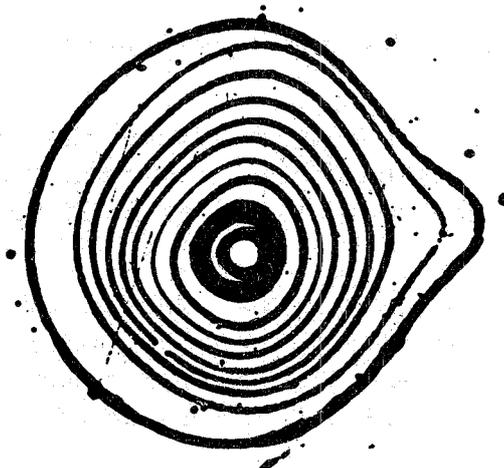


FIG. 16

Fra una curva e la successiva esiste un rapporto costante di densità uguale a 2. Tali curve sono state poi graficate in carta semilogaritmica (v. Fig. 17).

## RINGRAZIAMENTI -

Vivissimi ringraziamenti sono dovuti al personale del gruppo Macchina e dell'Officina per l'assistenza e l'accurata esecuzione dei vari lavori. Particolari ringraziamenti ai Sigg. ri Cesarini e Spina, cui si deve la sistemazione, rispettivamente, meccanica e strumentale dei canali di trasporto.

---

(x) - Questa misura è stata eseguita in collaborazione con i Dr. De Biase e Croci, dell'Osservatorio Astronomico di M. Mario.

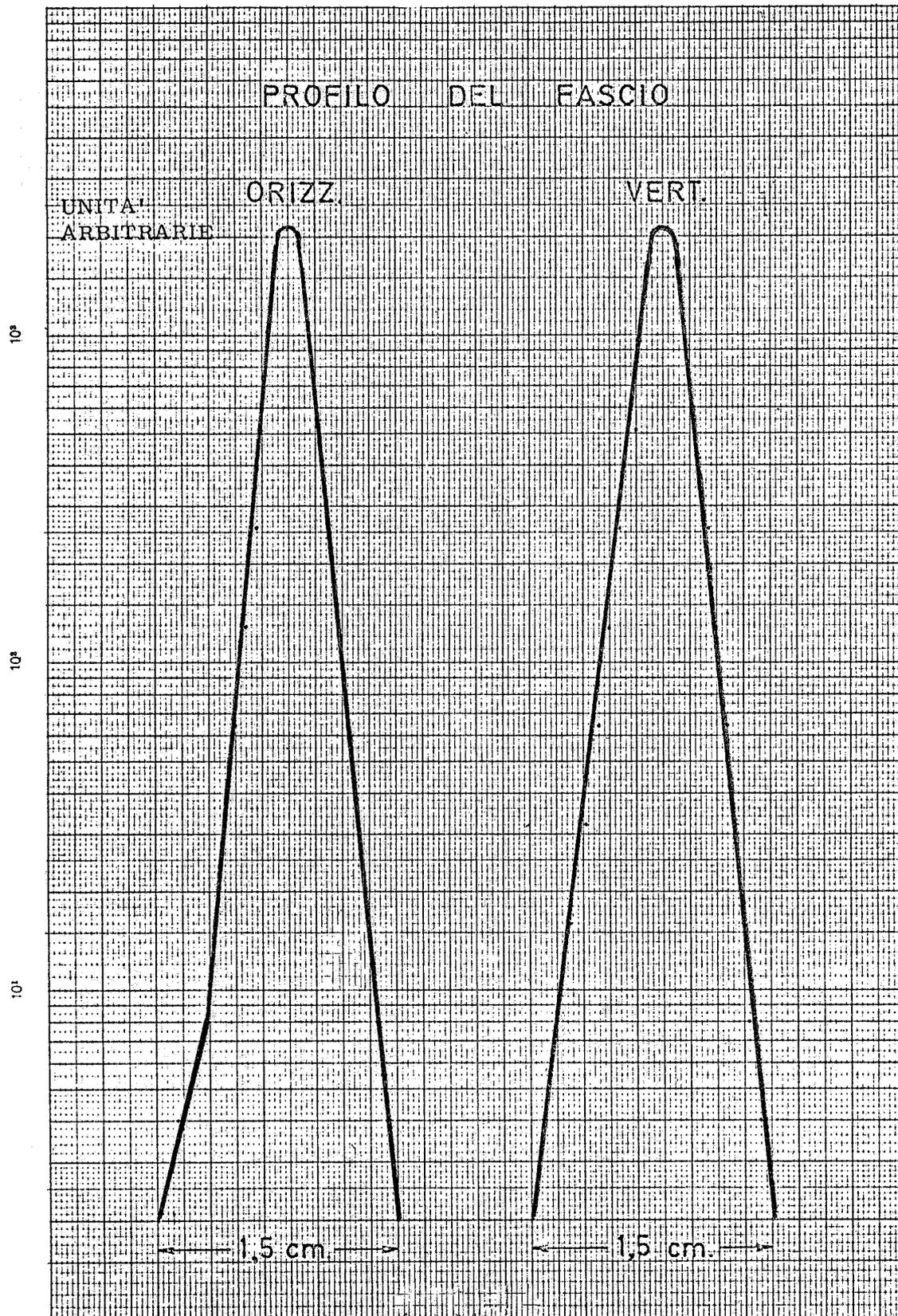


FIG. 17

CANALE N. 1

E		Q <sub>1</sub>	Q <sub>2</sub>	DV 1, 2	Q <sub>3</sub>	Q <sub>4</sub>
1000	T(V)	2.859	2.839	2.381	0.726	0.623
	S(mV)	74.88	74.76	68.62	20.95	17.01
900	T	2.531	2.495	2.130	0.676	0.563
	S	65.95	65.82	59.85	19.98	15.59
800	T	2.254	2.242	1.959	0.581	0.518
	S	58.74	58.72	55.04	17.29	15.02
700	T	1.964	1.954	1.758	0.522	0.439
	S	51.21	51.07	47.34	13.84	11.94
600	T	1.677	1.647	1.565	0.408	0.363
	S	43.81	43.30	40.80	11.26	11.42
500	T					
	S					

CANALE N. 2 1° BERSAGLIO

Energia		Q <sub>1</sub>	Q <sub>2</sub>	OR1	Q <sub>5</sub>	Q <sub>6</sub>
1000	T	3.020	2.475	3.227	1.250	3.470
	S	79.24	64.86	48.78	32.62	80.28
900	T	2.604	2.233	2.844	1.113	3.200
	S	67.97	58.42	42.22	29.46	72.45
800	T	2.376	1.991	2.576	0.994	2.936
	S	61.91	52.00	37.84	20.14	64.60
700	T	2.054	1.733	2.284	0.853	2.673
	S	53.49	45.45	32.66	22.65	56.24
600	T	1.753	1.461	2.027	0.727	2.396
	S	45.66	38.53	28.23	19.48	47.85
500	T	1.457	1.214	1.722	0.541	2.144
	S	38.12	32.23	23.06	16.30	40.34

CANALE N. 2 2° BERSAGLIO

E		Q <sub>1</sub>	Q <sub>2</sub>	OR1	Q <sub>5</sub>	Q <sub>6</sub>	Q <sub>7</sub>	Q <sub>8</sub>
1000	T	2.993	2.464	3.219	0.597	2.650	3.012	3.360
	S	78.57	64.82	48.80	16.32	56.15	81.20	91.26
900	T	2.562	2.228	2.885	0.539	2.477	2.573	2.758
	S	66.91	58.81	42.98	14.66	50.54	69.94	74.30
800	T	2.388	1.988	2.585	0.467	2.277	2.318	2.691
	S	62.24	52.24	37.82	12.93	44.32	61.79	72.07
700	T	2.056	1.741	2.298	0.411	2.100	1.996	2.295
	S	53.50	45.70	32.90	11.45	39.04	52.94	61.09
600	T	1.558	1.403	2.006	0.336	1.920	1.790	1.945
	S	45.84	36.95	27.88	09.69	33.76	47.41	51.57
500	T	1.463	1.234	1.722	0.275	1.720	1.416	1.565
	S	38.28	32.34	23.03	08.06	27.83	37.45	41.75

CANALE N. 3

E		Q <sub>1</sub>	Q <sub>2</sub>	OR1	OR2	Q <sub>9</sub>	Q <sub>10</sub>	Q <sub>11</sub>
630	T	2.032	2.170	3.848	4.668	2.040	0.570	2.476

BIBLIOGRAFIA -

- (1) - U. Bizzarri, M. Conte, I. F. Quercia, A. Turrin, Nuovo Cimento 42A, 639 (1966).
- (2) - C. Bovet, G. R. Lambertson, K. H. Reich, Report CERN 64-25 (1964) pag. 16.
- (3) - M. Bassetti, R. M. Buonanni, M. Placidi, Nucl. Instr. and Meth. 45, 93 (1966).
- (4) - M. Bassetti, R. M. Buonanni, LNF-66/29 (1966).