

LNF-63/34
7. 5. 1963.

F. Amman, R. Andreani, M. Bassetti, M. Bernardini, A. Cattoni,
V. Chimenti, G. Corazza, E. Ferlenghi, L. Mango, A. Massarotti,
C. Pellegrini, M. Placidi, M. Puglisi, G. Renzler e F. Tazzio
li: ELEMENTI DI PROGETTO DI UN ANELLO DI ACCUMU-
LAZIONE PER ELÈTTRONI E POSITRONI DA 750 MeV.

Nota interna : n. 199

Laboratori Nazionali di Frascati

Servizio Documentazione

LNF-63/34

Nota interna n. 199

7 Maggio 1963

F. Amman, R. Andreani, M. Bassetti, M. Bernardini, A. Cattoni, V. Chimenti, G. Corazza, E. Ferlenghi, L. Mango, A. Massarotti, C. Pellegrini, M. Placidi, M. Puglisi, G. Renzler, F. Tazzioli:

ELEMENTI DI PROGETTO DI UN ANELLO DI ACCUMULAZIONE PER ELETTRONI E POSITRONI DA 750 Mev.

I n d i c e

1) Introduzione	pag. 2
2) La struttura magnetica	" 5
3) Il magnete e l'alimentazione	" 14
4) Il programma delle misure magnetiche	" 25
5) L'iniettore	" 29
6) L'ottica di iniezione	" 34
7) Il deflettore	" 41
8) L'impianto di vuoto	" 47
9) La radiofrequenza	" 60
10) La luminosità all'incrocio dei fasci	" 69
Bibliografia	" 75

1) INTRODUZIONE

Come esposto in una precedente nota⁽¹⁾, a conclusione dei lavori preliminari del Gruppo di Studio di Adone si giunse alla proposta di far precedere, alla realizzazione di un anello di accumulazione per elettroni e positroni da 1.5 GeV, quella di un primo anello di minore energia, e più precisamente di 750 MeV.

Le ragioni di tale proposta possono essere così riassunte:

- 1) incertezza sui valori di corrente di positroni attendibili da un acceleratore lineare;
- 2) insufficienti informazioni sull'interazione coulombiana tra i due fasci circolanti nello stesso anello.

Volendo realizzare direttamente un anello da 1.5 GeV, saremmo stati quindi obbligati, per queste ragioni, a tenere notevoli margini di sicurezza, riconducibili ad un aumento dell'energia dell'acceleratore lineare funzionante da iniettore.

Poichè l'aumento di costo complessivo relativo a questo incremento di energia dell'acceleratore lineare, probabilmente non necessario, risultava paragonabile al costo di un anello di energia intorno ai 750 MeV, si reputò preferibile iniziare la progettazione di un anello da 750 MeV corredato di un iniettore la cui energia avrebbe dovuto essere sufficiente anche per un anello da 1.5 GeV, ma senza margini di sicurezza.

Nel corso della progettazione dell'anello da 750 MeV le ragioni suesposte hanno perso gran parte del loro peso, come accenneremo più avanti; perciò nel nostro lavoro abbiamo tenuto costantemente presente la possibilità di non costruire affatto l'anello di energia intermedia, ma di procedere direttamente alla realizzazione di quello da 1.5 GeV.

Ciononostante si è preferito portare a termine in forma organica il lavoro di progettazione dell'anello da 750 MeV per poter disporre di un quadro quanto più completo possibile di un tale tipo di macchina.

Gli elementi del progetto presentati nel seguito sono aggiornati al dicembre del 1962; alcune parti oggi sono, naturalmente, ad uno stadio notevolmente più avanzato. Per altre i criteri sono mutati. Sono intervenuti fenomeni nuovi, allora sconosciuti, che hanno modificato, almeno parzialmente, alcune soluzioni tecniche già studiate.

Possiamo citare, ad esempio, tra questi ultimi, l'"effetto Touschek"⁽²⁾. Esso consiste nel trasferimento del momento trasverso di una particella in momento longitudinale, in seguito ad una collisione con un'altra particella dello stesso fascio. La variazione di momento longitudinale che ne consegue può essere tale da portare le due particelle al di fuori della curva limite di accettazione della radiofrequenza, e quindi tale da provocarne la perdita contro le pareti della ciambella. La vita media del fascio viene a dipendere quindi, oltre che dalla pressione del gas residuo, anche dall'entità di questo effetto, e quindi dall'energia delle particelle, dalla tensione di radiofrequenza e dall'intensità dei fasci.

Questo effetto, osservato sperimentalmente su ADA nei primi mesi dell'anno in corso e in seguito interpretato da C. Bernardini e B. Touschek, non è trattato in questa nota.

Per alcune parti del progetto, non ancora completamente analizzate, si fa cenno solo ai criteri che si seguono nel loro studio: è il caso dell'ottica di iniezione. Per altre, che richiedono per il loro svolgimento ulteriori informazioni da misure sui modelli realizzati, ci si serve di dati indicati vi approssimati; è il caso del rendimento di iniezione, che dipende fortemente dall'andamento del campo disperso del deflettore, sul quale solo recentemente sono state compiute le misure necessarie.

Non è fuori luogo un breve cenno ai criteri generali che abbiamo seguito sinora nel nostro lavoro. Nell'intero progetto vi sono delle parti la cui realizzazione è particolarmente complessa, ma, allo stesso tempo, entro larghi limiti indipendente dalle soluzioni scelte per l'insieme dell'anello: è il caso del deflettore pulsato, e del sistema di vuoto.

Per queste, sulla base dei risultati degli studi preliminari, si è passati alla fase di realizzazione senza attendere la definizione del progetto dell'anello.

Analogamente per l'iniettore sono stati presi i contatti con le ditte interessate alla sua costruzione e si sono portate a termine le trattative in anticipo rispetto al congelamento dei parametri del magnete.

Così procedendo le parti meno convenzionali, nella cui realizzazione non è affatto improbabile che si incontrino difficoltà impreviste che ne ritarderanno l'approntamento, sono state iniziate con notevole anticipo rispetto al magnete e alla radiofrequenza, che presumibilmente dovrebbero presentare

minori incognite.

Per concludere riteniamo utile dare un cenno sugli ulteriori sviluppi del progetto, successivi al dicembre 1962.

Come detto più sopra, le ragioni che ci avevano indotto a proporre di realizzare un anello all'energia intermedia di 750 MeV sono oggi in gran parte superate, sia perchè maggiori sono le informazioni, sperimentali sulle correnti di positroni ottenibili da un acceleratore lineare, e teoriche sulla interazione coulombiana di due fasci in un anello, sia per lo aumento del costo dell'anello da 750 MeV relativamente a quello da 1.5 GeV, determinato essenzialmente dalla struttura magnetica scelta.

In conseguenza di ciò è stato deciso di procedere direttamente alla realizzazione dell'anello da 1.5 GeV. Della struttura magnetica restano praticamente invariati, rispetto al progetto per 750 MeV, i quadrupoli, mentre i magneti curvanti hanno un raggio di curvatura doppio; il numero dei periodi passa da 8 a 12, e la lunghezza della ciambella su un periodo resta praticamente invariata, come pure la sua sezione trasversa. Si sta invece considerando la possibilità di realizzare sia magneti che quadrupoli in lamierino di ferro dolce dello spessore di qualche millimetro invece che in ferro pieno.

L'impianto a radiofrequenza, cui si richiede una tensione di 150-200 KV per giro, risulta di potenza assai maggiore.

Nessun cambiamento subiscono il deflettore, l'iniettore e l'ottica di iniezione; l'impianto da vuoto richiede un numero di stazioni di pompaggio maggiore per un fattore 1.5.

Per quanto riguarda l'effetto Touschek, l'anello da 1.5 GeV risulta più conveniente di quello da 750 MeV anche all'energia di iniezione.

- 2) LA STRUTTURA MAGNETICA

Per l'anello di accumulazione da 750 MeV è stata scelta una struttura a foccheggiamento forte e funzioni separate a otto periodi in cui la maglia periodica ha lo schema seguente:

$$1) \quad \begin{array}{cccccccccccc} O & Q_F & O & B & O & Q_D & O & B & O & Q_F & O \\ l = 1.225 & .40 & .425 & .985 & .275 & .75 & .275 & .985 & .425 & .40 & 1.225 \end{array}$$

dove i simboli indicano

O sezione dritta

Q_F quadrupolo foccheggiante radialmente

Q_D quadrupolo defoccheggiante radialmente

B magnete curvante

l lunghezza magnetica in metri

L'indice di campo dei magneti ha il valore $n = 0,5$; il gradiente G dei quadrupoli può variare entro larghi limiti, dipendendo soltanto dalle correnti di alimentazione, e verrà fatto variare durante il funzionamento della macchina da valori dell'ordine di 70 gauss/cm all'iniezione, a valori dell'ordine di 150 gauss/cm in condizioni di regime, in modo da mantenere costante la grandezza $K = \frac{G}{B^2}$ (B_0 è la rigidità magnetica delle particelle).

Contemporaneamente varierà il campo magnetico dei magneti, da valori ~ 4700 gauss, a valori ~ 10.000 gauss: questo limite massimo del campo che non vogliamo superare per numerosi ovvi motivi, insieme all'energia massima di 750 MeV, impone un raggio di curvatura $S = 2,5$ metri per i magneti. La scelta del raggio di curvatura insieme alla richiesta di avere una orbita chiusa principale costituita da archi di cerchio e tratti di tangente, stabilisce in modo univoco la lunghezza totale dei magneti curvanti.

La struttura a funzioni separate permette di cambiare le proprietà foccheggianti, durante il funzionamento, cambiando il valore del gradiente dei quadrupoli.

Inoltre, qualora i magneti curvanti abbiano indice di campo $n = 0,5$, i tre modi di oscillazione (di betatrone radiale e verticale e di sincrotrone) hanno costanti di tempo di smorzamento sempre positive e indipendenti dalle proprietà foccheggianti della struttura⁽³⁾.

Godendo di queste proprietà, una struttura a foccheggia

mento forte e funzioni separate risulta particolarmente adatta per un anello di accumulazione per le seguenti ragioni:

1) gli effetti di interazione coulombiana tra i due fasci circolanti dipendono fortemente dal numero d'onda delle oscillazioni verticali di betatrone, e sono minimi per numero d'onda vicino ad un intero, condizione che però dà instabilità nel caso di un fascio solo circolante; inoltre il rendimento di iniezione dipende in modo abbastanza critico dal numero d'onda delle oscillazioni radiali di betatrone (4); è quindi molto conveniente disporre della possibilità di variare a piacere entro larghi limiti le condizioni di foccheggiamento per ottimizzare sperimentalmente sia il rendimento di iniezione che la luminosità all'incrocio dei fasci;

2) l'indipendenza delle costanti di tempo di smorzamento dalle proprietà di foccheggiamento lascia come unico vincolo su queste ultime la condizione di stabilità, e quindi permette, in sede di progetto, larga libertà di scelta per il tipo di maglia, periodicità e parametri, e, in sede di funzionamento, libertà di variazione dei numeri d'onda delle oscillazioni, ad eccezione dei valori cui corrispondono bande di instabilità.

La periodicità della struttura e l'armonica di radiofrequenza sono tra loro legate dalla condizione che, agli effetti dell'interazione coulombiana tra i due fasci, l'angolo di oscillazione di betatrone verticale deve essere poco maggiore di π .

Poichè, come è noto dalla teoria delle macchine acceleratrici, non conviene che detto angolo sia molto maggiore di $\pi/2$ per periodo, tutte le strutture considerate prevedevano una zona di incrocio ogni due periodi di macchina; essendo, inoltre il numero delle zone di incrocio pari al doppio della armonica di radiofrequenza, ne segue che il rapporto tra la periodicità della struttura e l'armonica di radiofrequenza è quattro.

La scelta della periodicità 8, e quindi dell'armonica 2 di R.F., risulta infine da un compromesso tra la necessità di avere un numero di zone di incrocio quanto maggiore possibile e la difficoltà ed il costo connessi con periodicità molto elevate.

Nella macchina vi sono quindi otto sezioni diritte: delle quattro in cui si ha incrocio dei fasci, due sono occupate dalle cavità acceleratrici e le altre due sono disponibili per la sperimentazione; delle altre quattro, due sono occupate dai deflettori pulsati per l'iniezione e le altre due pos-

sono essere usate per apparecchiature di misura dell'intensità dei fasci circolanti.

In tutte le sezioni dritte saranno poste anche le apparecchiature per il vuoto, il cui ingombro è stato valutato in circa 50 cm di sezione dritta.

Le sezioni dritte delle esperienze devono poter ospitare rivelatori a grande angolo solido per una sorgente estesa (di lunghezza quadratica media dell'ordine di 50 cm): questa è prodotta dalla sovrapposizione di due pacchetti di elettroni e positroni di distribuzione gaussiana in senso azimutale e di larghezza quadratica media circa 70 cm.

Pertanto è necessario che le sezioni dritte delle esperienze siano lunghe almeno 250 cm. Le altre sezioni dritte potrebbero avere lunghezze minori, ma in questo caso non si avrebbe più periodicità 8, con la conseguenza di aumentare le larghezze delle bande di instabilità.

Una maglia deve quindi contenere magneti con indice di campo $n = 0,5$ di lunghezza complessiva 197 cm, una sezione dritta di 250 cm, alcuni quadrupoli foccheggianti e alcuni quadrupoli defoccheggianti.

La scelta del numero, del tipo e della disposizione degli elementi è stata dettata da ulteriori criteri, atti a determinare un particolare andamento delle funzioni $\beta_R(s)$ radiale e $\beta_V(s)$ verticale, richiesto da esigenze concordi di iniezione e di carica spaziale.

È necessaria una breve parentesi sul metodo di iniezione.

L'ultima parte del canale di trasporto dal Linac all'anello è costituito per ciascun fascio da un deflettore a linea pulsato, il cui campo elettromagnetico imprime alle particelle da iniettare un angolo di curvatura di 5° . Il deflettore sarà lungo 120 cm, con raggio di curvatura di 14 metri e valore dell'induzione magnetica di 850 gauss. Il deflettore sarà quindi contenuto interamente in una sezione dritta e avrà una struttura aperta in direzione radiale per permettere il passaggio delle particelle circolanti nell'anello.

Allo scopo di perturbare il meno possibile il moto delle particelle circolanti nell'anello, l'orbita di iniezione radiale deve distare ~ 7 cm dall'orbita di equilibrio della macchina, e inoltre la gap del deflettore deve avere un'altezza verticale non superiore ai 2 cm, per ridurre l'intensità del campo disperso di deflessione in direzione radiale.

Di conseguenza i fasci saranno iniettati con grandi ampiezze radiali e piccole ampiezze verticali rispetto all'orbita di equilibrio della macchina.

Ricordiamo che l'inviluppo delle oscillazioni di betatrone è descritto dalle funzioni $\beta_R(s)$ e $\beta_V(s)$: se nella zona di iniezione β_R è lontano dal valore massimo, l'ampiezza radiale crescerà in altri punti della macchina, rendendo necessario costruire una ciambella con dimensione radiale maggiore di quella, già grande, richiesta nella zona di iniezione, e quindi di magneti con zona utile molto grande: conviene quindi che il β_R sia massimo, o vicino al valore massimo, nelle zone di iniezione, cioè nelle sezioni dritte.

Nelle zone di iniezione la gap del deflettore limita l'altezza verticale e quindi l'accettanza verticale della macchina.

Come sarà chiarito più avanti l'accettanza verticale in angolo migliora al diminuire di β_V , ed è quindi conveniente che β_V sia minimo. L'aumento dell'ampiezza verticale di oscillazione in punti della macchina con β_V massimo è sempre contenuto in una ciambella di dimensioni verticali moderate.

Per quanto riguarda gli effetti di carica spaziale, sappiamo che la densità trasversa limite, e quindi anche la luminosità ottenibile a parità di corrente circolante, è inversamente proporzionale al valore di β_V nella zona di incrocio dei fasci: anche da questo punto di vista è conveniente avere β_V minimo nelle sezioni dritte.

Osserviamo che le funzioni $\beta_R(s)$ e $\beta_V(s)$ sono periodiche con il periodo di macchina: perchè presentino al centro delle sezioni dritte dei punti estremi è necessario che la struttura della maglia risulti simmetrica rispetto ai centri delle sezioni dritte.

La maglia più semplice, costituita da un magnete, un quadrupolo foccheggiante e uno defoccheggiante, comunque disposti, non è mai simmetrica: abbiamo quindi preso in considerazione le maglie costituite da almeno cinque elementi tra magneti e quadrupoli.

Inoltre, per soddisfare alle richieste sull'andamento dei β , è necessario avvicinare i quadrupoli foccheggianti alle sezioni dritte; con la struttura scelta si ottiene rigorosamente β_R massimo e β_V minimo al centro delle sezioni dritte e inoltre ulteriori massimi di β_R nei quadrupoli foccheggianti.

Quest'ultimo risultato è conveniente per l'iniezione: infatti conviene che in tutta la zona di iniezione, che è este

sa per mezza sezione dritta, il β_R non si scosti molto dal valore massimo, cioè l'accettanza resti sempre elevata.

I vari tipi di struttura considerati sono stati studiati variando le lunghezze e i gradienti dei quadrupoli. A parità di lunghezze e di frequenze di betatrone la struttura prescelta richiede gradienti dei quadrupoli notevolmente inferiori alle altre (circa per un fattore 2) (5).

Ci siamo orientati su lunghezze dei quadrupoli relativamente piccole, tuttavia non inferiori a 40 cm, per motivi di linearità del campo.

La lunghezza del quadrupolo defoccheggiante è quasi doppia di quella dei quadrupoli focceggianti, in modo da ottenere, con uguali gradienti, valori circa uguali delle frequenze di betatrone radiale e verticale. Le frequenze di betatrone richieste dai calcoli per il rendimento di iniezione e per gli effetti di carica spaziale dovranno essere comprese tra 2.10 e 2.30.

Precisiamo che le lunghezze introdotte nei calcoli di struttura sono da intendersi come lunghezze magnetiche: si osserverà, più avanti, nella parte del progetto meccanico, l'uso di lunghezze minori, che sono quelle meccaniche, la cui determinazione viene fatta per via sperimentale.

Inoltre tra un elemento e l'altro sono state introdotte piccole sezioni dritte, per l'ingombro delle bobine ed eventuali accessori: la lunghezza di queste sezioni dritte influenza i valori dei β e delle frequenze di betatrone, ma non introduce nessuna criticità nel funzionamento della macchina.

I semiasse della sezione della ciambella dipendono dalle massime ampiezze di oscillazione radiale e verticale: quella radiale è l'ampiezza massima nel punto di iniezione, dove β_R è massimo, ed è ~ 10 cm, quella verticale è legata alla ampiezza verticale del punto di iniezione dalla relazione:

$$Z_{\max} = \sqrt{\frac{\beta_V \max}{\beta_V \text{ iniez.}}} \cdot Z_{\max \text{ iniezione}} \sim 2 \text{ cm}$$

In realtà, quando si tenga conto degli effetti di accoppiamento tra le oscillazioni di betatrone radiali e verticali e degli errori di allineamento, si vede che conviene scegliere una semialtezza verticale della ciambella ~ 4 cm.

Per questi motivi non conviene costruire quadrupoli con zona utile a sezione circolare, perchè buona parte di essa

resterebbe inutilizzata.

Anche l'altezza e la larghezza radiale della gap dei magneti sono state progettate tenendo conto delle dimensioni già citate per la zona utile necessaria, aumentate degli ingombri di apparecchiature ausiliarie quali il circuito di riscaldamento della ciambella stessa.

L'accettazione della macchina può essere calcolata nella zona di iniezione come area/ \sqrt{v} delle ellissi, radiale e verticale, di equazioni

$$2') \quad W_R = \alpha_R x^2 + 2\alpha_R x x' + \beta_R x'^2$$

$$2'') \quad W_V = \alpha_V x^2 + 2\alpha_V x x' + \beta_V x'^2$$

ed è data esplicitamente ($\alpha_R = \alpha_V = 0$) da

$$W_R = \frac{x^2_{\max}}{\beta_R} = \frac{10^2}{625} = 1,6 \cdot 10^{-1} \text{ cm x rad}$$

$$W_V = \frac{z^2_{\max}}{\beta_V} = \frac{1}{311} = 3,2 \cdot 10^{-3} \text{ cm x rad}$$

Naturalmente la presenza della gap del deflettore rende W_V minore del valore dovuto solo alla macchina, perchè $Z_{\max} = 1 \text{ cm}$; tuttavia il fatto che β_V sia minimo fa sì che la (2'') rappresenti un'ellisse con grande semiasse Z' , il che significa che vengono accettati grandi angoli in verticale: se nelle sezioni dritte β_V fosse massimo, si avrebbe un'ulteriore diminuzione dell'accettazione verticale.

In uscita dal deflettore le emittanze radiale e verticale dei fasci sono numericamente uguali a quelle assunte per il fascio in uscita dal Linac ($1 \text{ cm x } 10^{-3} \text{ rad}$); il sistema ottico di iniezione provvede ad adattare le regioni dei piani rappresentativi $X X'$ e $Z Z'$ in modo da portare la figura di emittanza verticale internamente all'ellisse di accettazione verticale, e perfettamente centrata; e la figura di emittanza radiale internamente all'ellisse di accettazione radiale, ma con semiasse, posizione del centro e orientamento tali da rendere massimo il rendimento di iniezione, cioè la percentuale di particelle iniettate che è ancora in macchina al termine dell'impulso di iniezione.

Concludiamo questo capitolo preliminare riassumendo

TABELLA I

Parametri della macchina da 750 MeV

Raggio di curvatura dei magneti	$\rho = 250$ cm	
Raggio medio	$R = 940$ cm	
Periodicità	8	
Campo dei magneti (massimo)	$B = 10000$ gauss	
Gradiente quadrupoli (massimo)	$G = 150$ gauss/cm	
Indice di campo dei magneti	$n = 0.5$	
Lunghezza (magnetica) magneti	98,5 cm	
Lunghezza (magnetica) quadrupoli foccheggianti	40 cm	
Lunghezza (magnetica) quadrupoli defoccheggianti	75 cm	
Lunghezza sezioni dritte	27,5 cm	
	42,5 cm	
$K = \frac{G}{B}$	0,60 m ⁻¹	foccheggiante
	-0,55 m ⁻¹	defoccheggiante
Frequenze di betatrone	2,156	radiale
	2,194	verticale
β massimo	6,24 m	radiale
	11,36 m	verticale
β minimo	2,39 m	radiale
	2,55 m	verticale
Fattore di forma massimo	1,45	radiale
	2,64	verticale
Fattore di forma minimo	0,55	radiale
	0,58	verticale
Momentum compaction	$\alpha = 0,188$	
Costanti di smorzamento per E = 750 MeV	$\tau_x = 26$	10^{-3} sec betatr. rad.
	$\tau_y = 26$	10^{-3} sec betatr. vert.
	$\tau_s = 13$	10^{-3} sec sincrotrone
per E = 350 MeV (iniezione)	$\tau_x = 0.26$	sec betatr. rad.
	$\tau_y = 0.26$	sec betatr. vert.
	$\tau_s = 0.13$	sec sincrotrone
Orbita chiusura radiale per $\frac{\Delta E}{E} = 1\%$	$y_{max} = 2,34$ cm	
	$y_{min} = 1,44$ cm	

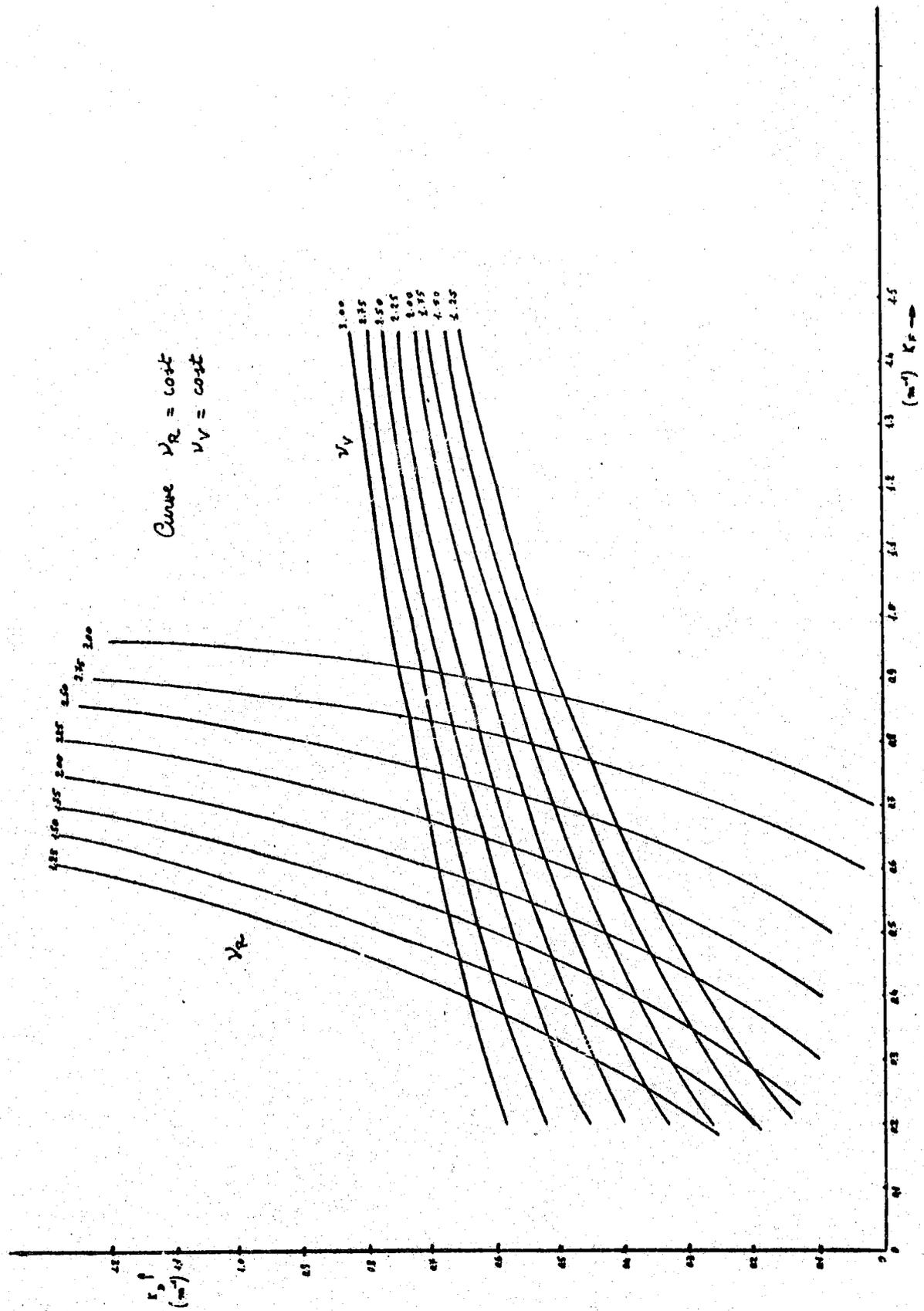


FIG. 1

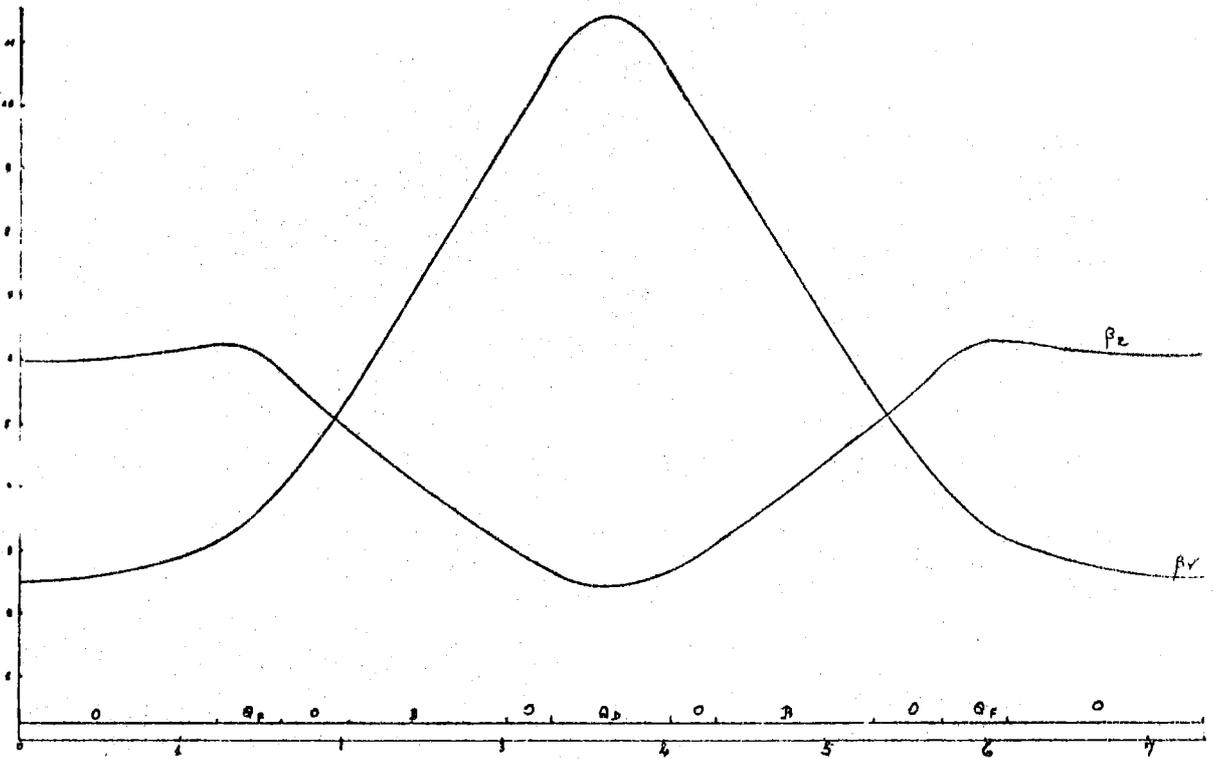
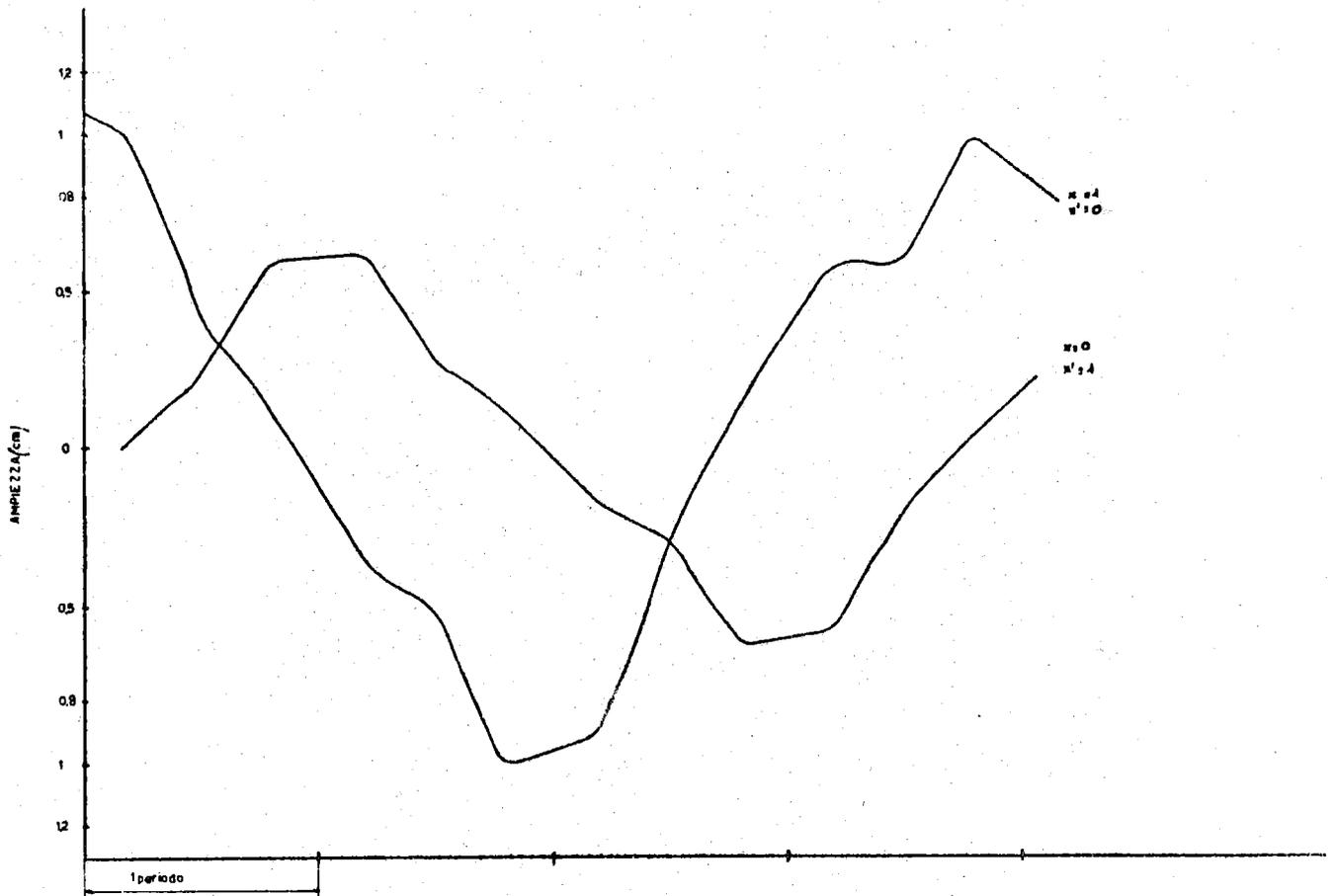


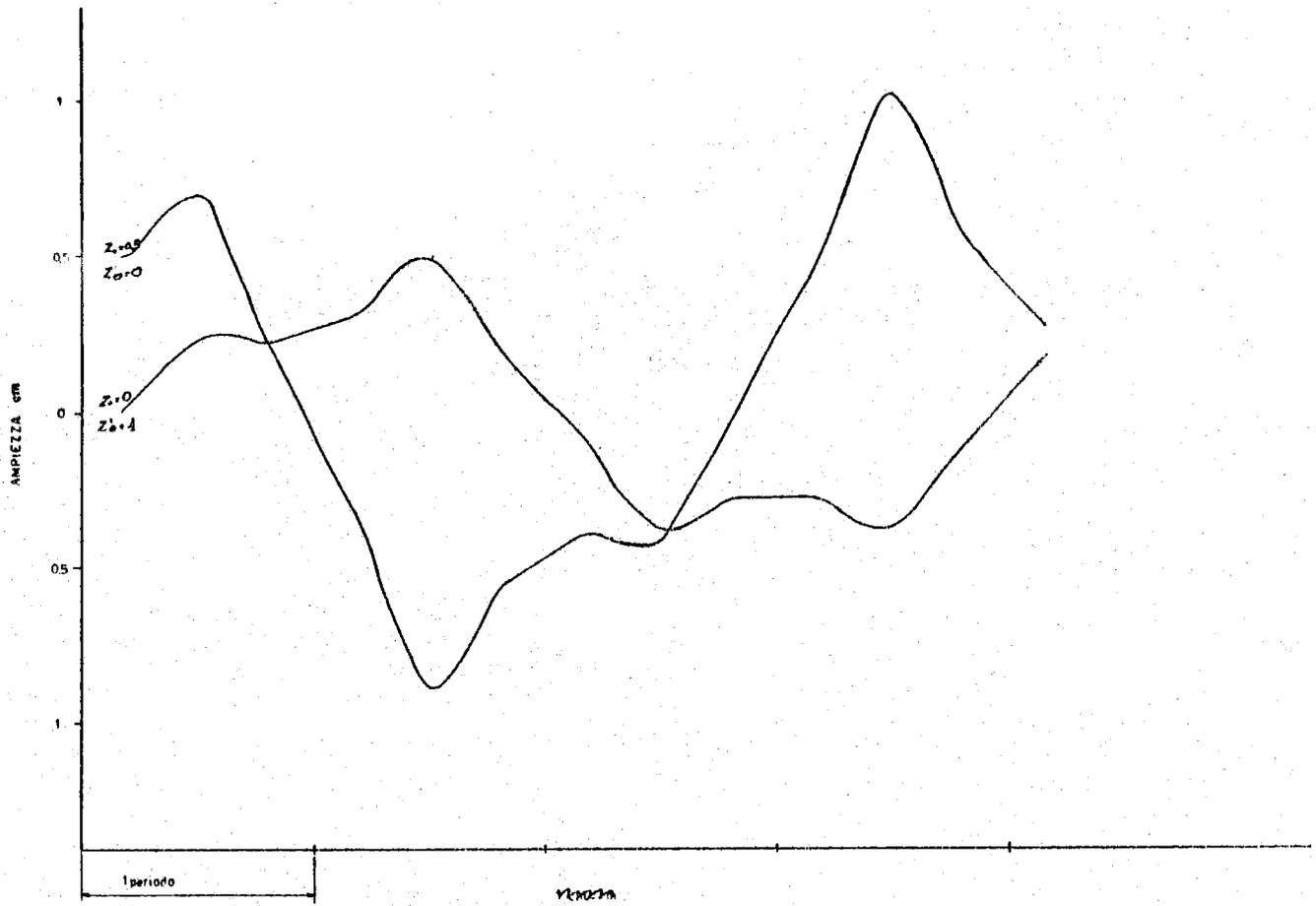
FIG. 2



1 periodo = $\frac{1}{2} Q_1 B Q_2 B Q_1 \frac{1}{2}$

1m

FIG. 3



1 periodo = $\frac{Q}{2} \cdot Q_0 \cdot B \cdot Q_0 \cdot B \cdot Q_0 \cdot \frac{Q}{2}$

4m

FIG. 4

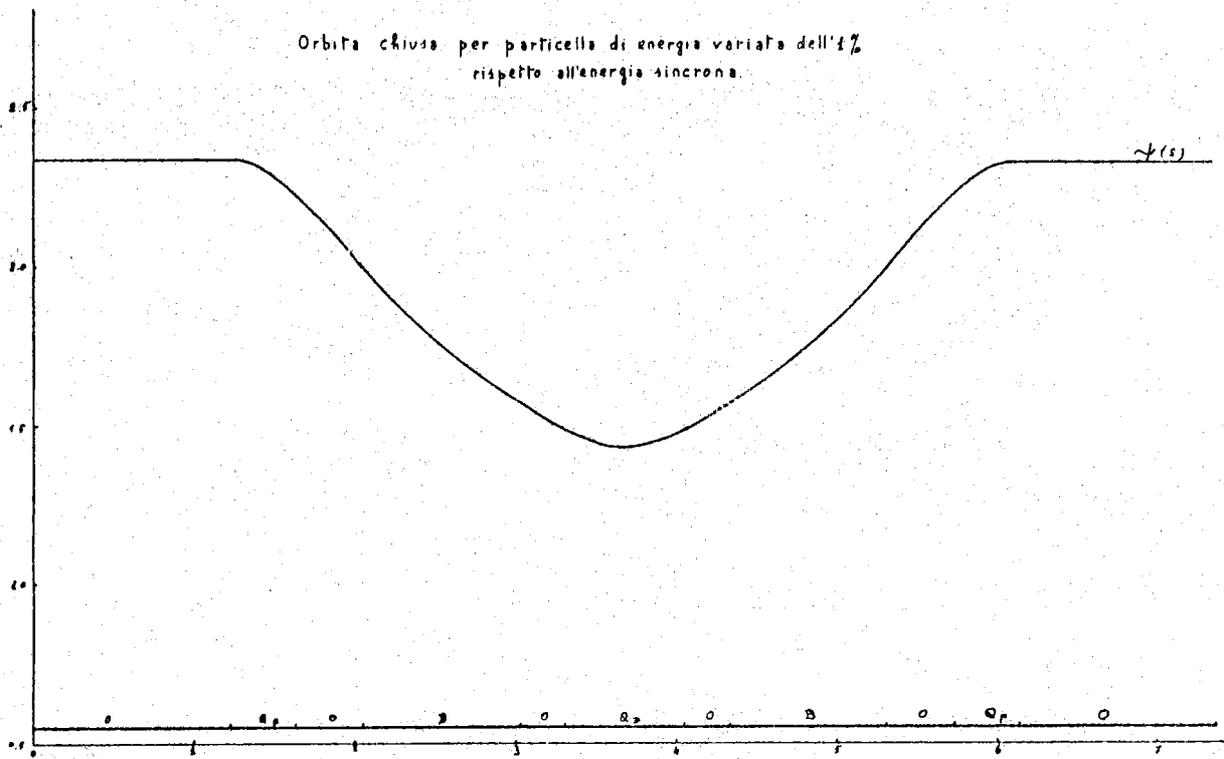


FIG. 5

TABELLA II

Tolleranze per la macchina da 750 MeV

	Quadrupoli	Magneti
Disallineamento radiale ^(*)	$3 \cdot 10^{-1}$ mm	1,4 mm
Disallineamento verticale ^(*)	$2 \cdot 10^{-1}$ mm	1,1 mm
Disallineamento azimutale ^(**)	≤ 1 mm	$2 \cdot 10^{-1}$ mm
Fluttuazioni lunghezze magnetiche ^(**)	≤ 1 mm	$2 \cdot 10^{-1}$ mm
Rotazioni intorno all'asse radiale ^(***)	$1,1 \cdot 10^{-2} \div 2,5 \cdot 10^{-3}$ rad	$3 \cdot 10^{-3} \div 6 \cdot 10^{-4}$
Rotazioni intorno all'asse ottico	$1 \cdot 10^{-3} \div 2 \cdot 10^{-4}$ (***)	$2 \cdot 10^{-4}$
Rotazioni intorno all'asse verticale ^(***)	$1 \cdot 10^{-2} \div 2,5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-1} \div 2,5 \cdot 10^{-2}$
Errori di gradiente e indici di campo	4%	5%

(*) Il corrispondente spostamento delle orbite chiuse radiali e verticale è ≤ 5 mm

(**) Il corrispondente spostamento dell'orbita chiusa radiale è ≤ 5 mm

(***) I due valori corrispondono a diversi valori della differenza tra le frequenze di betatrone:

$$|\nu_R - \nu_V| = \begin{cases} 0.10 \\ 0.02 \end{cases}$$

con la condizione che il coefficiente di accoppiamento tra oscillazioni di betatrone radiali e verticali risulti minore od uguale a 10^{-2} .

3) IL MAGNETE E L'ALIMENTAZIONE

a) I magneti curvanti

Come descritto nella introduzione, la struttura scelta per l'anello di accumulazione da 750 MeV è ad 8 periodi. Ciascun periodo, come appare nella fig. 6 è costituito da 2 magneti curvanti con raggio di curvatura 2500 mm ed indice di campo $=0,5$, 2 quadrupoli focheggianti ed un quadrupolo defoccheggiante con gradienti massimi pari a 150 gauss/cm.

Per la realizzazione dei magneti si è scelto un ciclo di lavorazione che consente di ridurre a valori trascurabili gli errori relativi sulle quote corrispondenti dei trasferi dei diversi blocchi; è intuitivo che le differenze fra tali quote rientrano fra le cause degli errori accidentali che vanno mantenuti entro le tolleranze date nel capitolo 2) tabella II. Pertanto, una elevata precisione relativa nella lavorazione si presenta come un necessario ed utile mezzo per limitare gli errori casuali per quella parte che compete alla costruzione e al montaggio dei singoli magneti.

Come risulta dalle figg. 7, 8 e 9, i magneti, a forma di C, sono costituiti in due pezzi simmetrici rispetto al piano di accoppiamento e si intendono realizzati su tornio a giostra mediante due piazzature ciascuna comprendente 16 mezzi magneti. Ciascun magnete è poi ottenuto accoppiando fra loro i pezzi di una piazzatura con quelli dell'altra in modo che l'errore assoluto sulle quote del traferro, che non deve superare, in base alle tolleranze indicate, un massimo di $\frac{1}{10}$ mm risulti dello stesso segno e uguale per tutti i magneti. In questo modo la lavorazione meccanica assicura una buona omogeneità geometrica dei trasferi dei diversi magneti. Non si possono tuttavia trascurare imperfezioni del tornio o di montaggio, nel qual caso l'errore relativo tra magnete e magnete sull'altezza del traferro, in corrispondenza ad un qualunque raggio di curvatura compreso fra le estremità del polo, potrà agevolmente, grazie alla tornitura dei magneti in blocco, essere contenuto entro $\pm 2/100$ mm.

Le quote indicate sui disegni sono ancora da intendersi come dimensioni di massima, in particolare l'angolo azimutale di $22^{\circ} 30'$, riportato come angolo meccanico, indica la deflessione magnetica dei fasci. Le dimensioni meccaniche azimutali dei magneti curvanti risulteranno minori per effetto del campo disperso e verranno precisate a seguito di misure magnetiche del campo integrale eseguite sui modelli.

Come risulta dalle figg. 7, 8 e 9, i magneti, a forma di

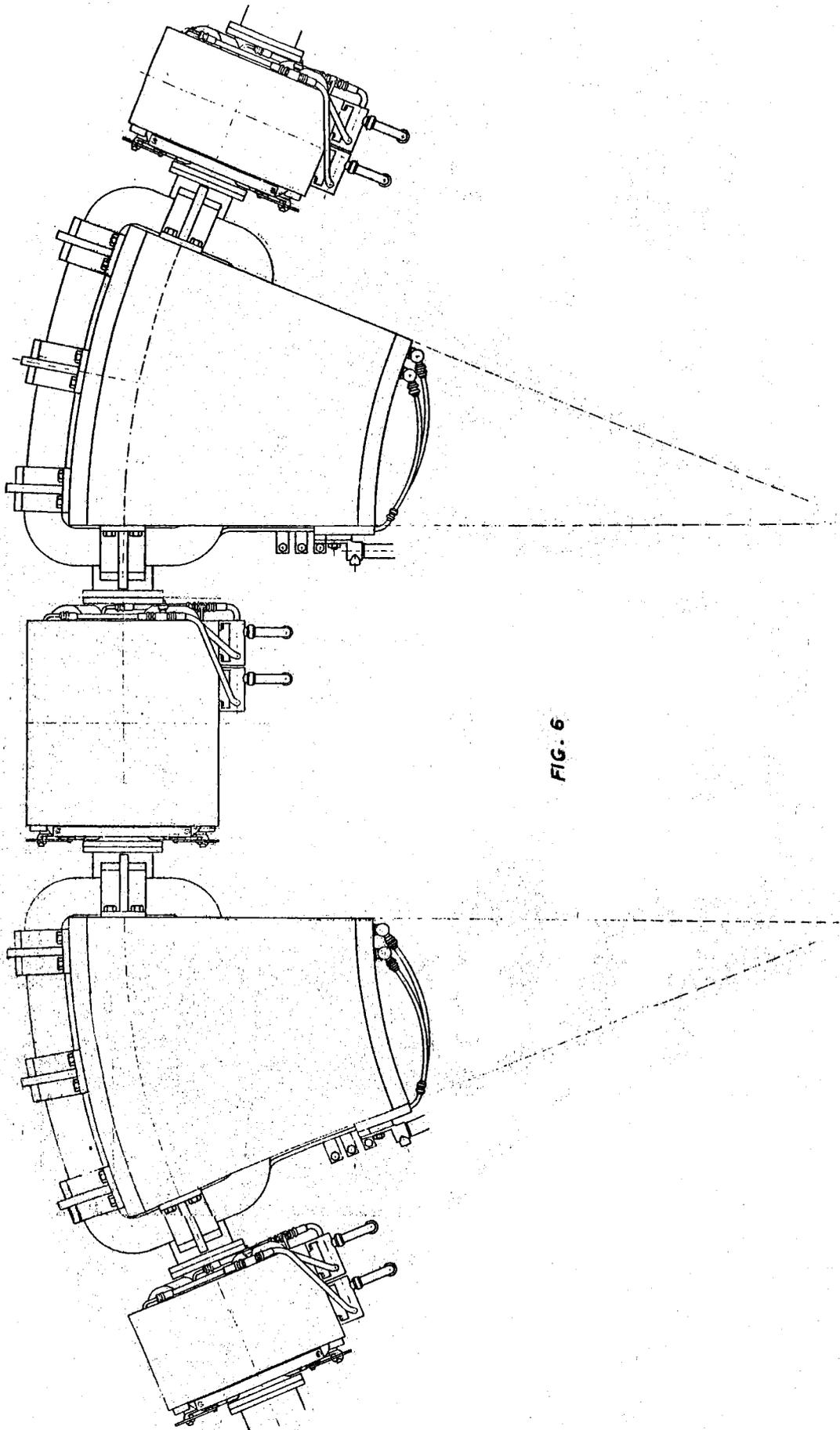
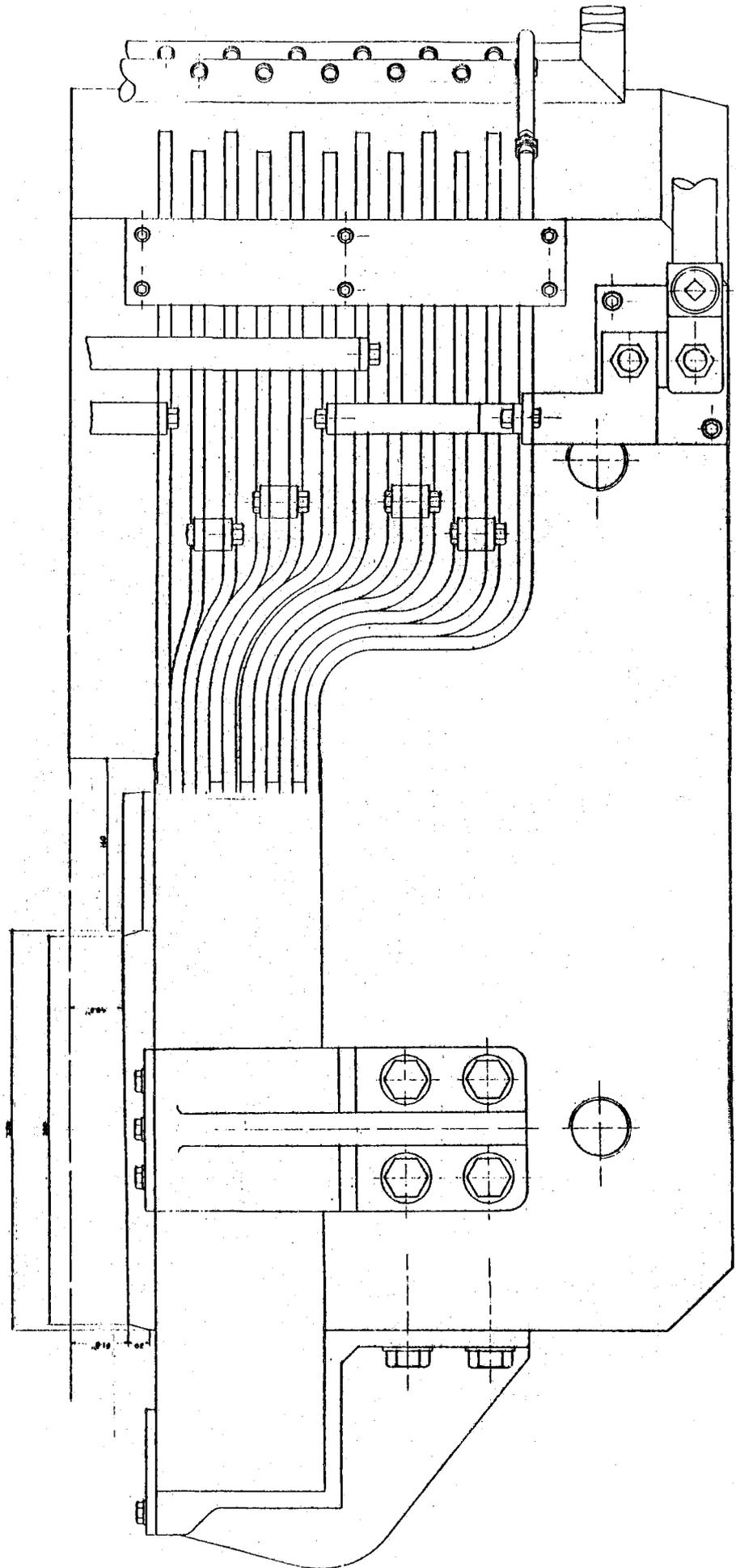
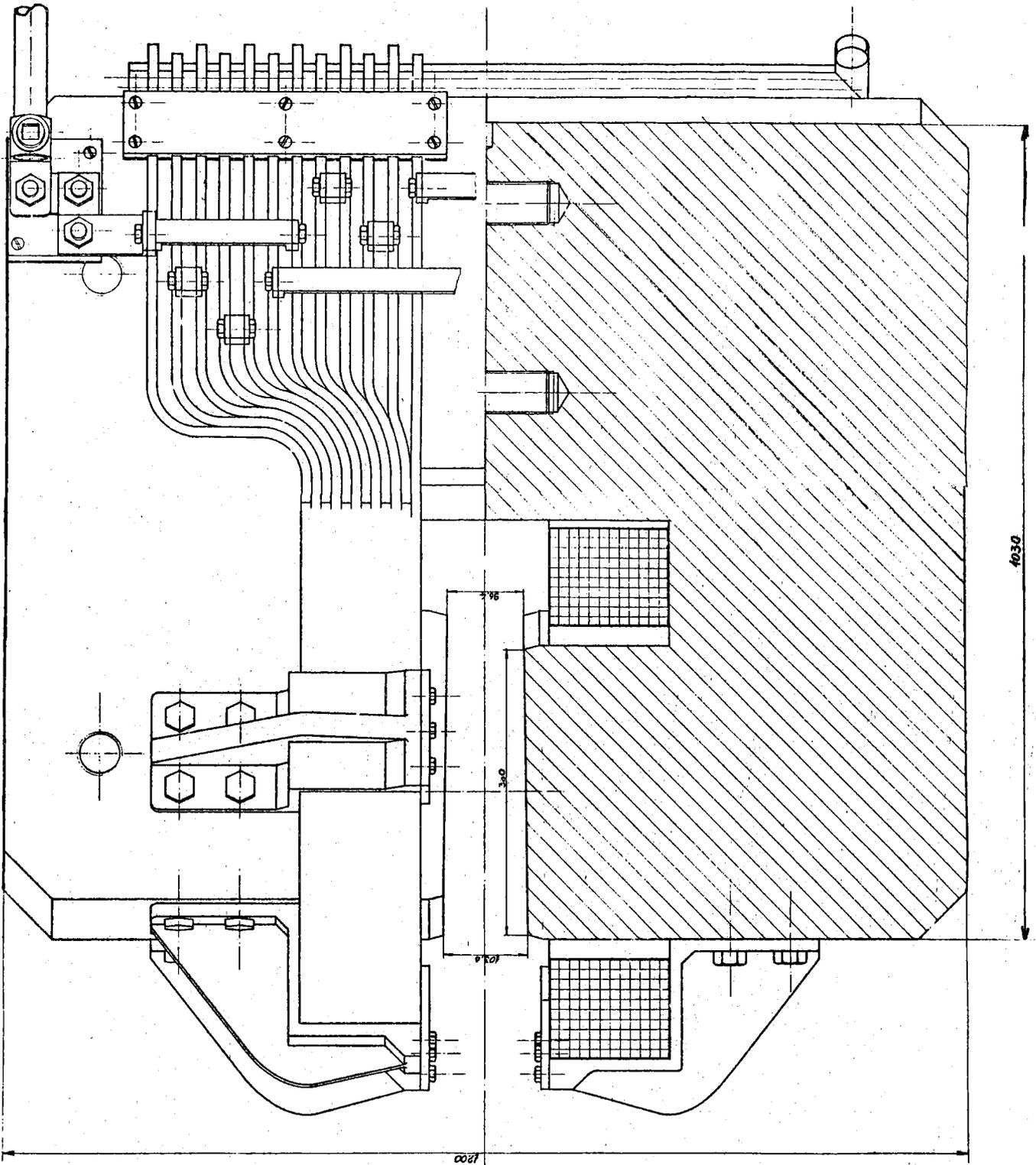


FIG. 6





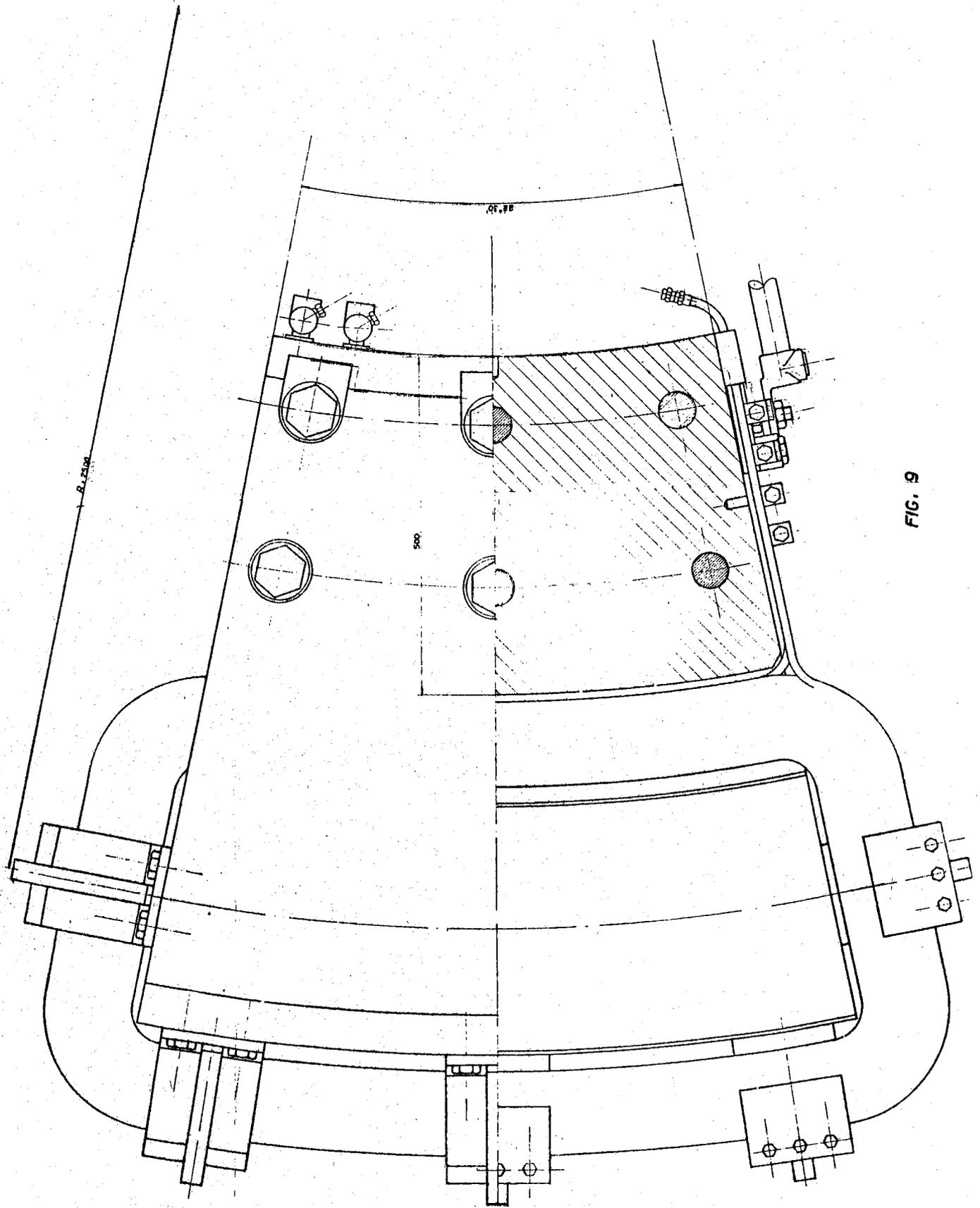


FIG. 9

Nella tabella sotto riportata che completa quella data in un precedente lavoro (6) vengono indicati i principali dati magnetici, elettrici, meccanici e di raffreddamento relativi ai magneti curvanti.

TABELLA I

Caratteristiche dei magneti.

Circuito magnetico

- Forma: a C
- Materiale: acciaio fucinato, 24.000 Asp/m a 2,0 Wb/m²
- Poli a facce piane; inclinazione rispetto alla mezzzeria orizzontale $X = \arctg 0,01$
- Dimensioni traferro: Altezza centrale = 100,0 mm
" max = 103,6 mm
" minima = 96,4 mm
Larghezza poli radiale = 360 mm
Lunghezza azimutale magnetica = 985 mm
- induzione sull'orbita di equilibrio $\frac{Wb}{m^2}$ 1 (1,2)
- induzione alla base delle espansioni polari " 1,26 (1,51)
- flusso totale (utile + disperso) Wb 0,463 (0,556)
- lunghezza media traferro m 0,1
- lunghezza media ferro m 2,7
- area base polare m² 0,36
- area gamba di ritorno m² 0,378
- induzione media gamba di ritorno $\frac{Wb}{m^2}$ 1,225 (1,470)
- c.d.t.m. traferro Asp 79.600 (95.500)
- c.d.t.m. ferro Asp 1.900 (5.000)
- c.d.t.m. nel ferro in rapporto al traferro % 2,4 (5,2)
- f.m.m. totale Asp 81.500 (100.500)

Caratteristiche elettriche

- numero spire		240	
- numero spire per bobina		120	
- corrente max	A	342	(417)
- conduttore quadro rame forato	mm ²	12x12Ø7	
- sezione netta	mm ²	105	
- densità di corrente	A/mm ²	3,26	(3,97)
- resistenza 1 bobina a 60°C	Ω	0,0768	
- tensione ai morsetti di un magnete (2 vie in parallelo)	V	26,3	(32)
- potenza per bobina	KW	9	(13,35)
- potenza per magnete	KW	18	(26,7)
- lunghezza spira media	m	3,20	
- peso conduttore al m lineare	Kg	0,938	
- peso di una bobina	Kg	360	
- tensione totale per 16 magneti in serie	V	420	(510)
- potenza totale	KW	290	(430)
- caratteristiche generatore	550 KW	1000 A	550 V

Caratteristiche meccaniche

- errore assoluto rispetto ai valori teorici sulle quote verticali delle gap	±	$\frac{1}{10}$	mm
- (eventuale) errore relativo fra magneti e magnete sulle stesse quote	±	$\frac{2}{100}$	mm
- peso ferro 1 magnete	Kg	7.800	
- forza attrazione poli	Kg	114.500	(21.000)
- bulloni d'accoppiamento 6 x Ø		56 MB	
- massimo sforzo nei bulloni	Kg/mm ²	3	
- freccia elastica sulla mezzeria polare mm		0,04	

Raffreddamento

- potenza per bobina	KW	9	(13,35)
----------------------	----	---	---------

- vie idrauliche in parallelo per bobina	N°	6	
- potenza per via idraulica	KW	1,5	(2,23)
- coefficiente f (formula di Darcy)		$7,64 \cdot 10^{-3}$	
- salto termico ammesso per $1 \text{ H}_2\text{O}$		15°C	
- portata necessaria per via idraulica $1/1$		1,5	(2,23)
- caduta di pressione	Atm	1,45	(3,2)
- portata totale per un magnete (12 vie idrauliche in parallelo)	$1/1$	18	(26,7)

b) I quadrupoli

Le tolleranze dell'anello d'accumulazione impongono per i quadrupoli una lavorazione meccanica ugualmente accurata che per i magneti; è più difficile però ridurre gli errori casuali, poichè non vi è la possibilità di lavorarli in blocco con un'unica piazzatura.

I quadrupoli, di lunghezza 350 mm (foccheggianti) e 700 mm (defoccheggianti), presentano la stessa sezione (figg. 10, 11 e 12) e sono costituiti dalle espansioni polari, dai gioghi e dalle due colonne di sostegno.

I poli sono prismatici, a profilo iperbolico e possono essere ottenuti sulla piastra con un utensile a copiare assicurando la uguaglianza geometrica dei profili polari; tuttavia il valore del gradiente nel traferro, la posizione dell'asse ottico, la posizione angolare degli assi di simmetria della lente sono influenzati dal posizionamento reciproco dei poli.

Poichè ogni quadrupolo richiede una propria operazione di piazzatura e di accoppiamento delle espansioni polari ai gioghi appare evidente che, anche avendo poli tutti uguali, i vari quadrupoli, a montaggio effettuato, potrebbero risultare geometricamente diversi per errori casuali di accoppiamento e di montaggio dando così origine a disallineamenti non compensabili. Ad evitare ciò, e con lo scopo di avere i quadrupoli con tolleranze relative molto stringenti, si è studiato il seguente metodo di lavorazione.

I gioghi grezzi sono lavorati agli incastri e fissati con bulloni e spine di riferimento alle colonne di sostegno; si procede quindi alla tornitura interna ed esterna dei gioghi. Le espansioni polari vengono prima lavorate a sezione rettangolare, rispettando le precisioni indicate sul disegno (fig. 10)

per la sola larghezza; successivamente si ricava il profilo polare con utensile a copiare. I poli, così lavorati, vengono poi montati sulla maschera di cui alla fig. 13 (unica per tutti i quadrupoli) e torniti esternamente di precisione per l'accoppiamento ai gioghi.

Il complesso dei poli, sostenuto dalla maschera, dopo la tornitura, viene messo in posizione sui gioghi già accoppiati alle colonne e quindi fissato ad essi con bulloni e spine di riferimento. La maschera può essere costruita con elevata precisione e consente di ottenere l'uguaglianza geometrica dei traferri di tutti i quadrupoli; se ci sono errori, essi sono quelli di costruzione della maschera e quindi uguali per tutti i quadrupoli.

L'eventuale errore (accidentale) dovuto alla non coincidenza degli assi del complesso dei poli con gli assi dei gioghi, all'atto del montaggio, (rotazione degli assi della lente) non ha importanza in quanto l'allineamento dei quadrupoli viene eseguito facendo riferimento agli assi del complesso dei poli e non agli assi del complesso gioghi-colonne.

Sulla fig. 10 sono indicate le tolleranze sulle quote del traferro che servono per stabilire la precisione di lavorazione della maschera e il dimensionamento dei calibri di controllo (tipo passa-non passa).

Nella tabella seguente si riportano i principali dati di progetto magnetici, elettrici, meccanici e di raffreddamento relativi ai quadrupoli della macchina da 750 MeV.

TABELLA II

Caratteristiche dei quadrupoli

Circuito magnetico

- materiale: acciaio fucinato 24.000 Asp/m a $2 \frac{\text{Wb}}{\text{m}^2}$
- poli: a profilo iperbolico
- minima distanza fra centro lente e poli 100 mm
- dimensioni traferro:
 - minima distanza orizzontale poli 89,70 mm
 - minima distanza verticale poli 61,65 mm
- gradiente massimo ottenibile 400 gs/cm

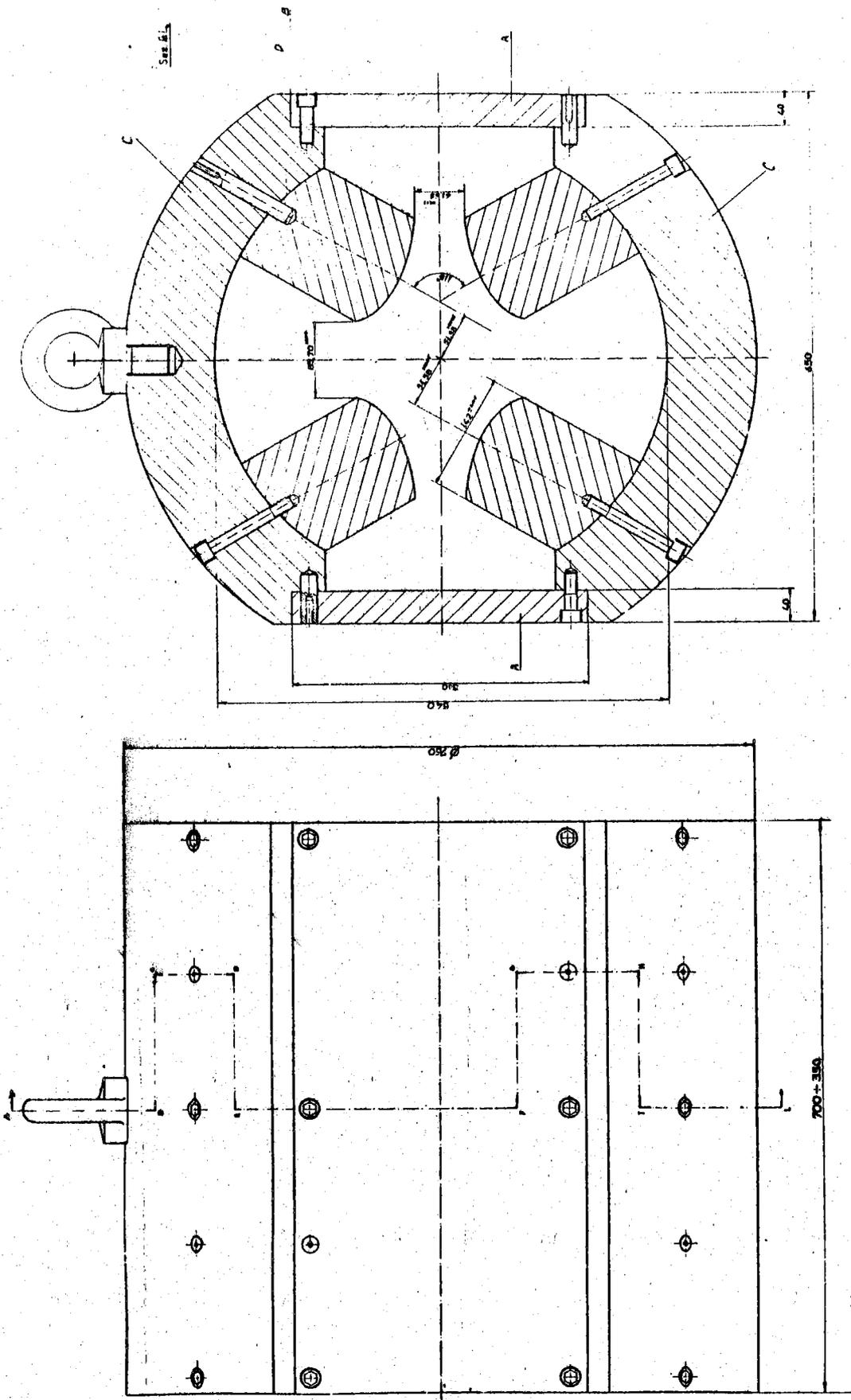


FIG. 10

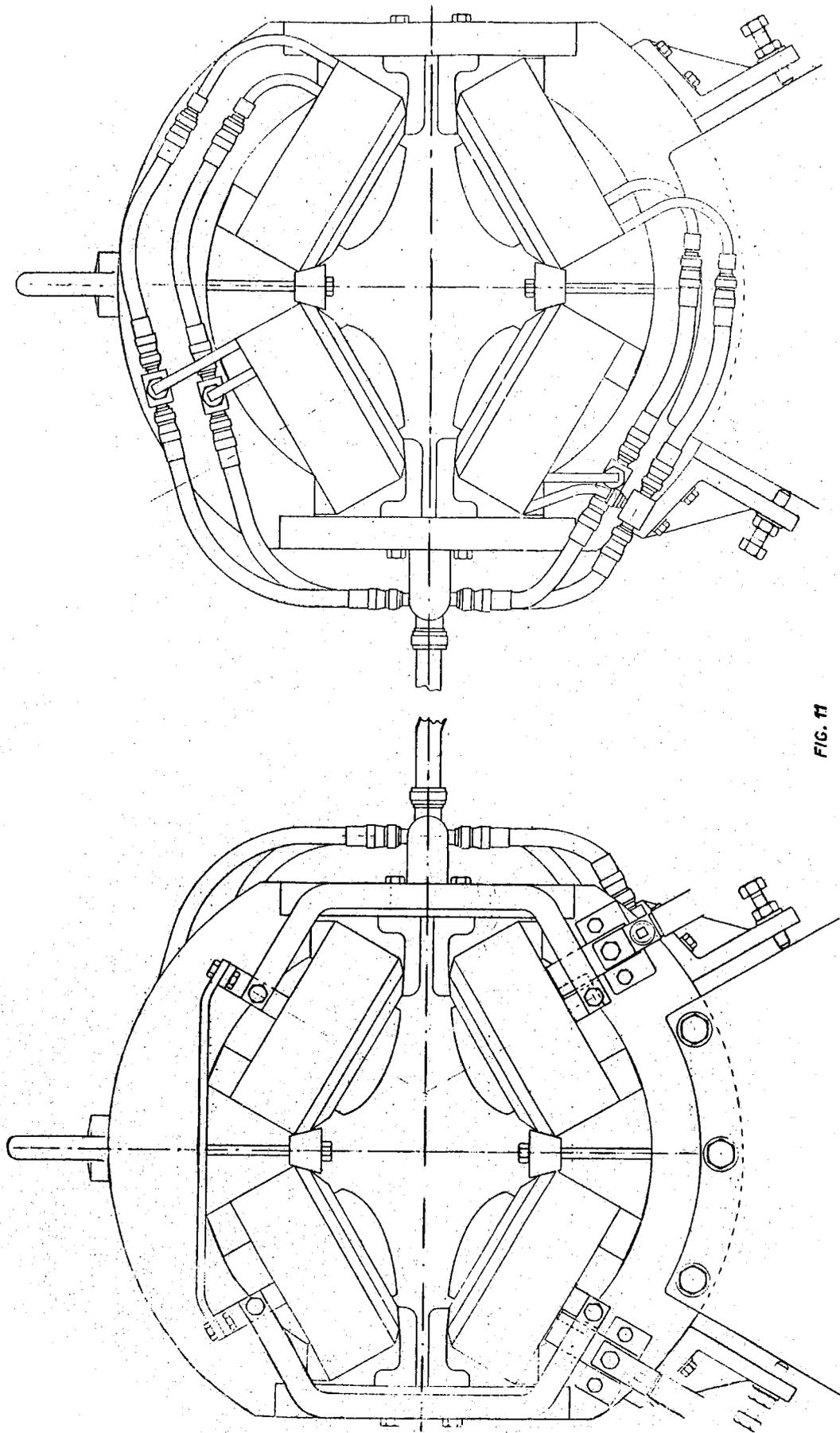


FIG. 11

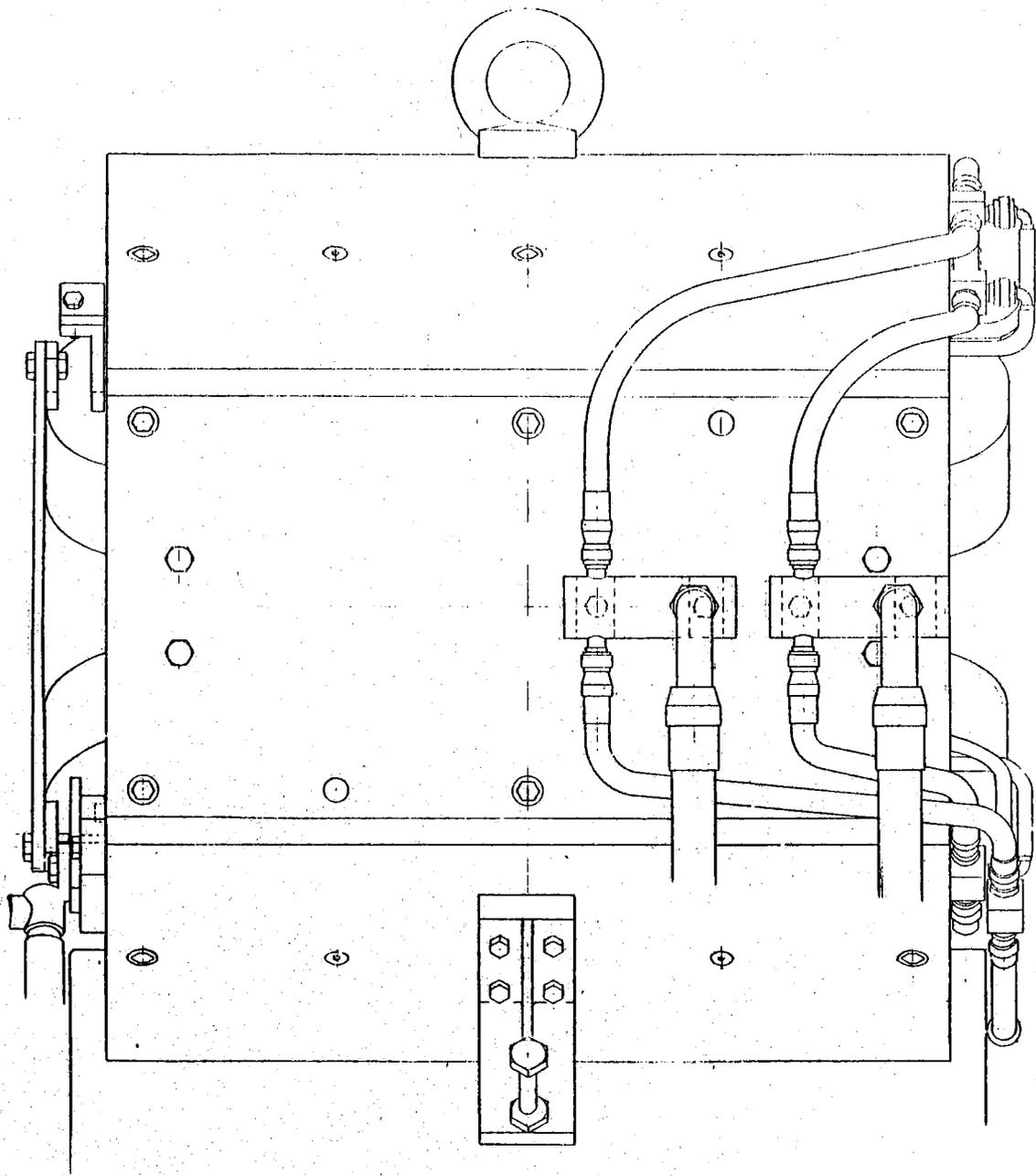


FIG. 12

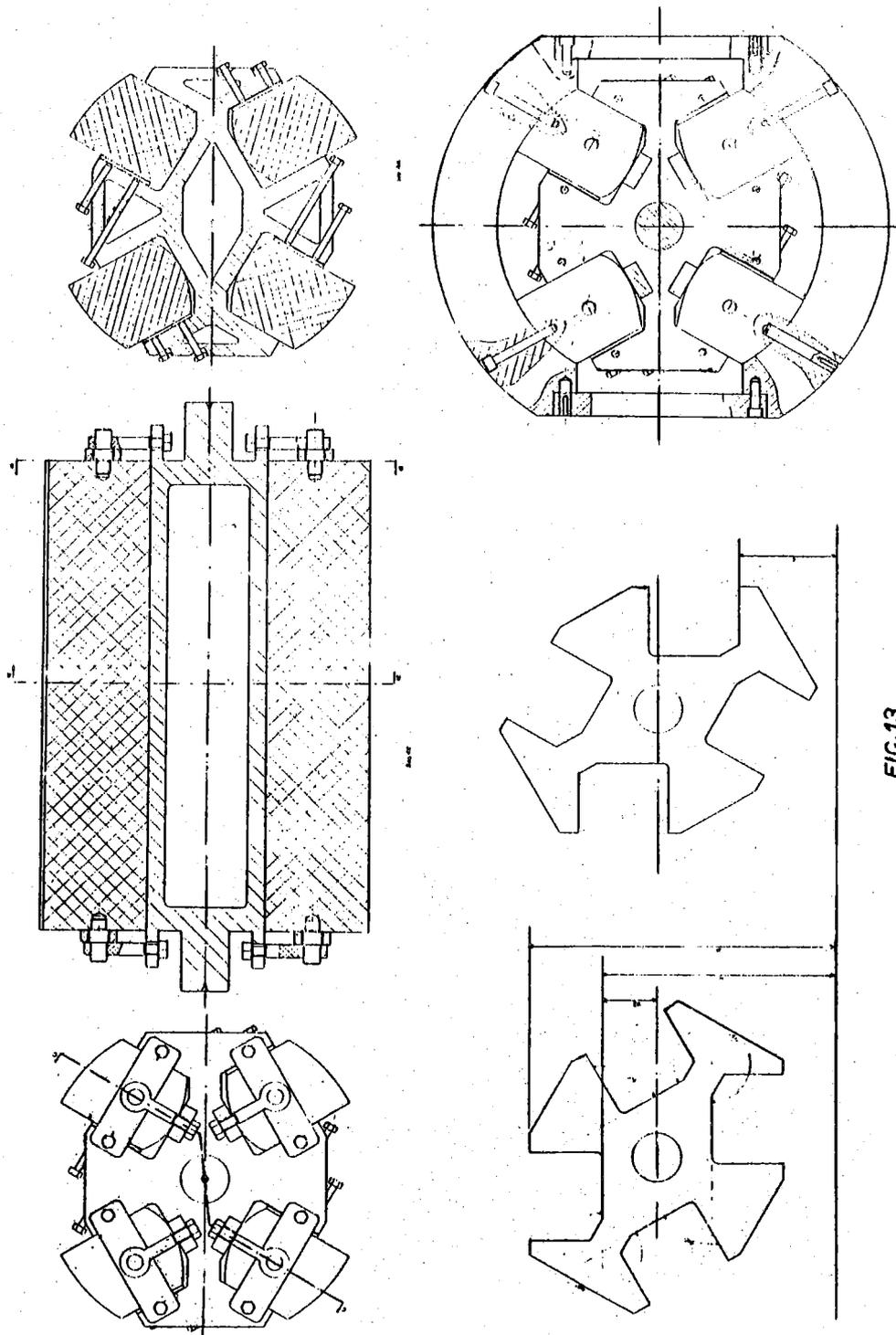


FIG. 13

- induzione max ferro 1,5 Wb/m²
- f.m.m. per polo 16.000 Asp

Caratteristiche elettriche

- numero spire per bobina 32
- corrente per G = 200 Gs/cm A 250
- conduttore quadro rame forato mm² 12 x 12 Ø 7
- sezione netta mm² 105
- densità di corrente max A/mm² 2,37
- resistenza 1 bobina a 60°C 0,0096 (F) 0,0134 (D)
- tensione di morsetti 1 quadrupolo (1e bobine in serie) V 9,6 (F) 13,4 (D)
- potenza per bobina KW 0,6 (F) 0,84 (D)
- potenza per quadrupolo KW 2,4 (F) 3,35 (D)
- lunghezza spira media m 1,5 (F) 2,1 (D)
- peso conduttore al metro lineare Kg 0,938
- peso di una bobina Kg 45 (F) 63 (D)
- tensione totale per i quadrupoli in serie V 153 (F) 107 (D)
- potenza totale KW 38,5 (F) 27 (D)
- caratteristiche generatori 200 V 300 A (F), 150 V 300 A (D)

Caratteristiche meccaniche

- tolleranze sulle quote del traferro ± 0,5/100 mm
- tolleranze sulle quote della maschera di montaggio ± 0,5/100 mm
- peso ferro 1 quadrupolo Kg 900 (F) 1800 (D)

Raffreddamento

- quattro circuiti in parallelo per quadrupolo
- salto termico ammesso per l'H₂O 15°C
- portata necessaria per via idraulica l/1, 0,6 (F) 0,84 (D)
- caduta di pressione atm 0,2 (F) 0,55 (D)
- portata totale per quadrupolo l/1, 2,4 (F) 3,35 (D)

c) Allineamento

Le operazioni di allineamento consistono nel posizionare correttamente rispetto ad un'orbita chiusa i vari componenti dell'anello d'accumulazione.

Le orbite chiuse sono determinate, in base alle caratteristiche magnetiche e geometriche della macchina progettata, in modo che, in assenza di errori, una di tali orbite coincida con l'asse meccanico longitudinale del traferro dei magneti e dei quadrupoli. In assenza di errori, sui tratti curvi di tale linea geometrica il campo magnetico ha rigorosamente lo stesso valore e sui tratti rettilinei è identicamente nullo. In una macchina ideale si potrebbe pertanto definire l'orbita di allineamento facendo semplicemente riferimento ad assi e a piani meccanici.

In una macchina reale gli errori sia meccanici che magnetici fanno sì che nessuna delle orbite chiuse possibili coincida con quella ideale. Suddividendo i possibili errori in sistematici (uguali in tutti gli elementi dello stesso tipo) e relativi (diversi da elemento a elemento), occorre subito notare che il tipo di lavorazione meccanica scelto e le tolleranze prefissate rendono gli errori relativi meccanici praticamente trascurabili mentre per quanto riguarda i sistematici, cui la lavorazione meccanica può dar luogo, essi possono essere agevolmente compensati - data la loro lieve entità - agendo sui parametri della macchina come RF., correnti di alimentazione, spazi di libertà dei basamenti ecc.

Pertanto, nel nostro caso, l'incertezza sulla posizione dell'orbita chiusa rimane circoscritta all'influenza di disomogeneità magnetiche dovute in pratica alle variazioni della permeabilità magnetica del ferro tra un blocco e l'altro, a parità di amperspire applicate. Ne segue la necessità di definire i riferimenti magnetici di ciascun elemento e di tener conto di quanto la posizione di questi possa eventualmente scostarsi dai corrispondenti piani ed assi meccanici.

Per i magneti occorre quindi ricercare il piano magnetico mediano; l'orbita di equilibrio sarà una linea appartenente a tale piano lungo la quale si ha un certo valore di B_z uguale in tutti i magneti. Nei quadrupoli il riferimento è costituito dall'asse ottico che è l'asse longitudinale lungo il quale si ha $B = 0$; occorre inoltre individuare gli assi OZ (verticale) e OX (orizzontale) della lente; questi appartengono alle superfici equipotenziali sulle quali si ha rispettivamente $B_z = 0$ e $B_x = 0$.

Determinati con misure magnetiche i riferimenti sopra detti, nonché la loro posizione rispetto ai corrispondenti piani ed assi meccanici, l'allineamento potrà essere effettuato utilizzando l'apparecchiatura meccanica di misura e di posizionamento di cui si descrivono qui i componenti principali.

Il sistema d'allineamento studiato consiste in una struttura a forma di triangolo isoscele il cui vertice coincide col centro della macchina, sul quale è fissato un teodolite tipo Wild, e la cui base porta agli estremi i due centri di curvatura di un ottante (cerniere) nei quali sono imperniati due opportuni compassi (vedi fig. 14). Esso ha come requisito principale una perfetta ripetibilità delle posizioni reciproche dei centri di riferimento passando da un ottante al successivo.

Infatti le posizioni relative dei tre centri possono sempre essere ricondotte a quelle teoriche mediante la registrazione delle cerniere porta compassi dotate di movimenti secondo tre coordinate ortogonali. Le distanze reciproche si leggono su nastri di invar mediante opportuni apparati ottici, e gli angoli mediante il teodolite. I due compassi che permettono il posizionamento dei magneti sono anch'essi di invar e terminano con la punta di un comparatore; ad allineamento effettuato il comparatore scorrendo sulla superficie cilindrica posteriore di un magnete, il cui centro di curvatura coincide col centro della cerniera, indica zero.

La complanarità dei vari componenti dell'anello viene assicurata dal teodolite traguardando successivamente opportuni riferimenti che materializzano il piano mediano dell'orbita delle particelle.^(x)

Eventuali rotazioni del piano medio dei magneti rispetto al piano ideale dell'orbita d'equilibrio e dei quadrupoli

(x) - Per un teodolite Kern DKM3 l'errore medio quadratico derivante dal centramento della livella zenitale e dalla lettura del cerchio verticale è inferiore a $\pm 0,5''$. Poiché la distanza massima dei riferimenti dal centro della macchina è di 8250 mm la complanarità può essere assicurata entro la seguente precisione:

$$\Delta Z = \pm 8250 \operatorname{tg} 0,5'' = \pm 0,02 \text{ mm}$$

attorno all'asse ottico possono essere controllate mediante livella con la precisione di $\pm 2 \cdot 10^{-5}$ rad. Per il posizionamento azimutale e radiale dei quadrupoli si fa riferimento ai magneti precedentemente allineati.

Poiché le operazioni di allineamento impongono necessariamente spostamenti e rotazioni dei magneti e quadrupoli, sono stati studiati opportuni basamenti (vedi fig.15) che consentono movimenti sul piano secondo due coordinate ortogonali e rotazioni attorno ad un punto del piano stesso, comandate mediante martinetti; ogni basamento poggia su tre viti calanti per consentire gli spostamenti verticali e le rotazioni attorno ad assi paralleli al piano d'appoggio. Per i quadrupoli è prevista inoltre la possibilità di rotazione attorno all'asse ottico.

I basamenti dei magneti e le viti calanti di appoggio sono dotati di un cuscinetto d'olio in pressione allo scopo di equilibrarne parzialmente o totalmente il peso per facilitare i movimenti sul piano orizzontale e verticale. Tali cuscinetti d'olio renderanno possibile il posizionamento fine dei magneti.

Nella tab.III sono riassunti i valori dei disallineamenti equivalenti agli errori nelle misure ed operazioni di posizionamento ed agli errori meccanici di lavorazione.

Dato il tipo di lavorazione meccanica scelto per la realizzazione dei magneti, gli errori di lavorazione sono essenzialmente sistematici; quelli casuali sono trascurabili rispetto agli analoghi errori casuali dovuti al posizionamento.

d) L'alimentazione.

Per l'alimentazione dei magneti curvanti e dei quadrupoli sono necessari tre generatori indipendenti, aventi le seguenti caratteristiche:

- | | | |
|----|--------|----------------|
| 1) | 550 KW | 550 V - 1000 A |
| 2) | 60 KW | 200 V - 300 A |
| 3) | 45 KW | 150 V - 300 A |

Essi debbono essere stabilizzati in corrente. Il grado di stabilizzazione richiesta è diverso: per i magneti curvanti (il cui campo magnetico definisce l'energia dei fasci) occorre un'alimentazione stabilizzata meglio di 10^{-3} , possibilmente entro $\pm 2 \times 10^{-4}$. Ciò dipende dal fatto che, per la sperimentazione, si richiede un'elevata stabilità in energia, in modo da sfruttare convenientemente l'alta definizione in ener-

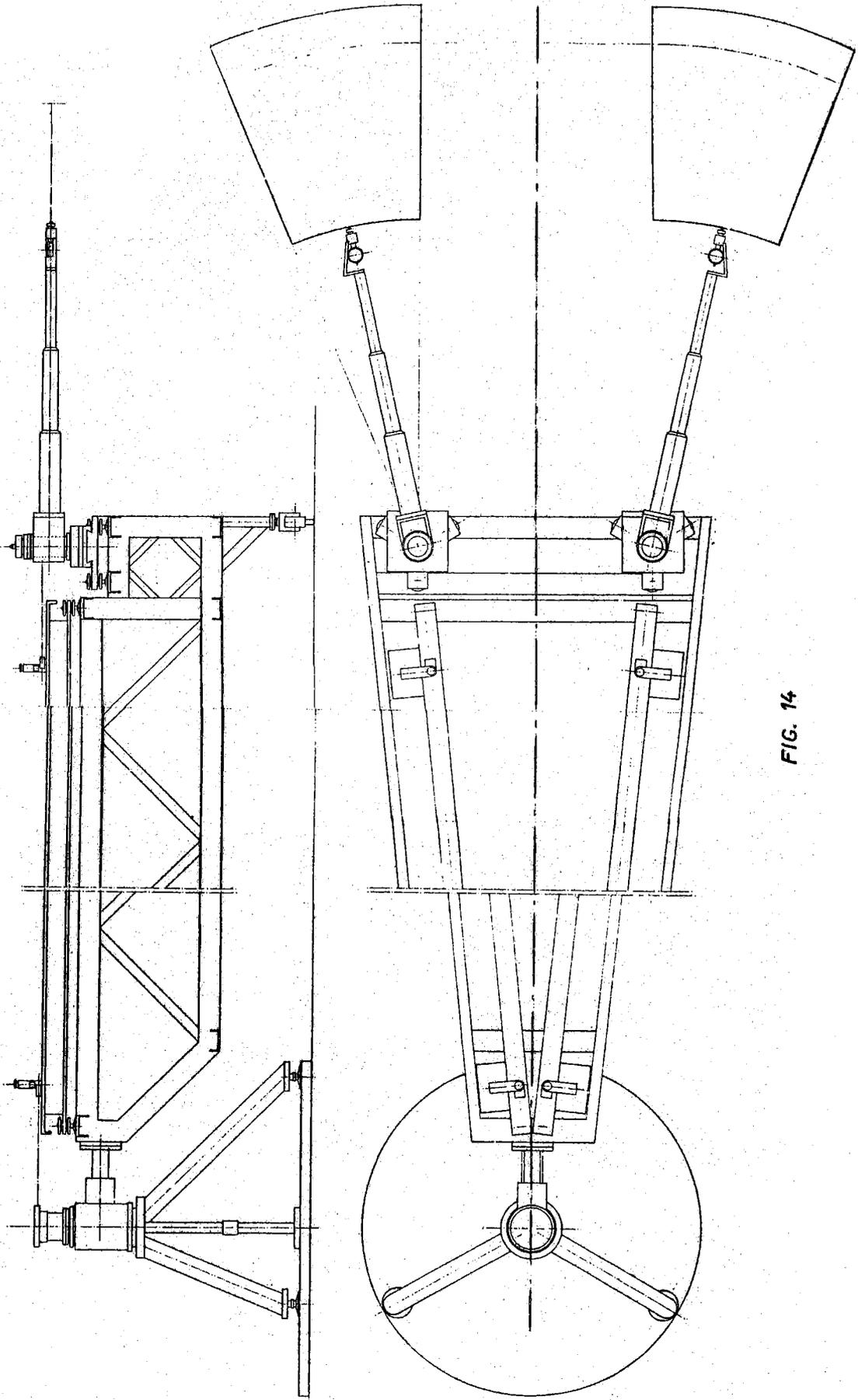


FIG. 14

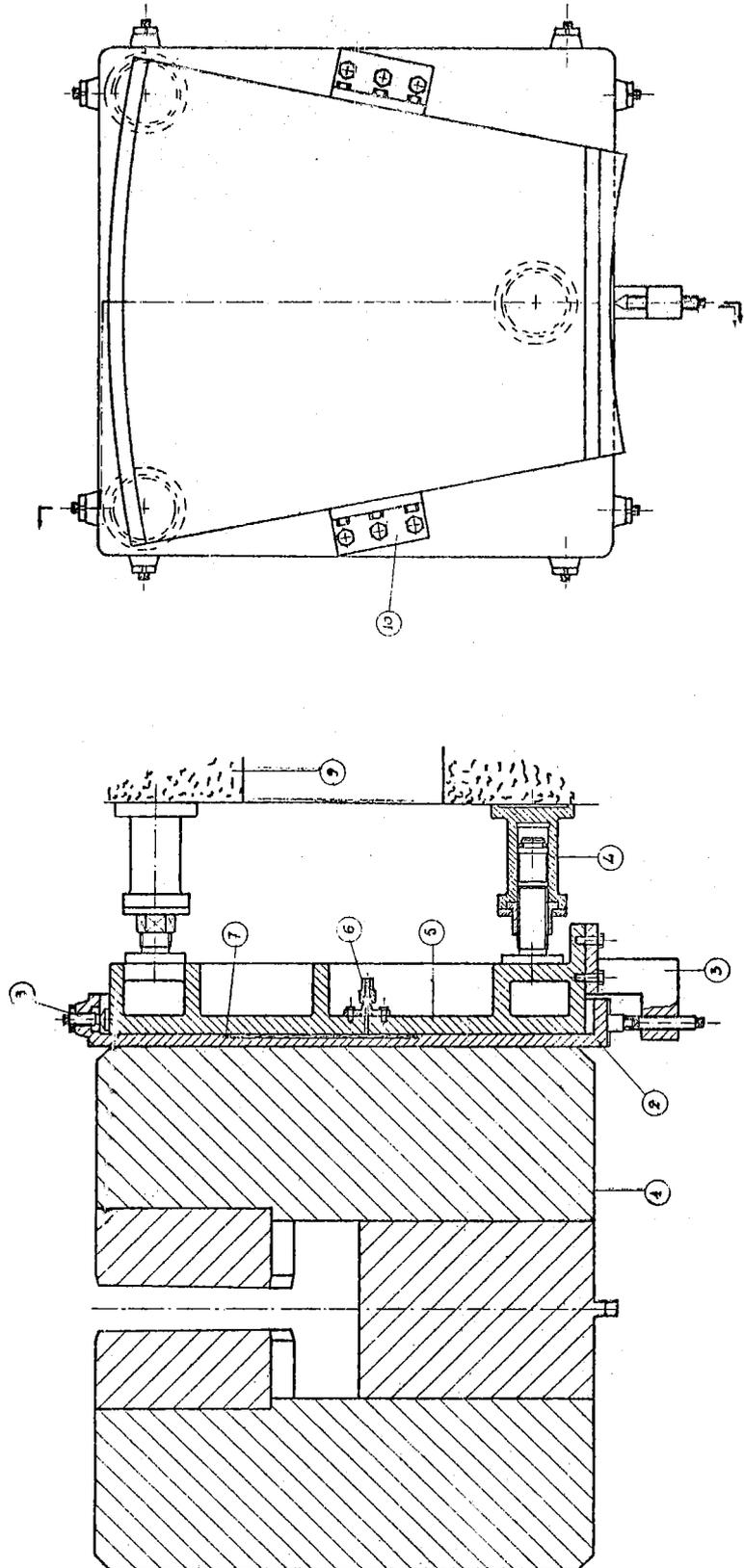


FIG. 15

TIPI DI ERRORE	LAVORAZIONE				ALLINEAMENTO				Disallineamento equivalente agli errori meccanici di lavorazione.		Disallineamento equivalente agli errori meccanici di lavorazione.	
	LAVORAZIONE		ALLINEAMENTO		LAVORAZIONE		ALLINEAMENTO		Disallineamento equivalente agli errori meccanici di lavorazione.		Disallineamento equivalente agli errori meccanici di lavorazione.	
	sagnetti	quadrupoli	sagnetti	quadrupoli	sagnetti	quadrupoli	sagnetti	quadrupoli	sagnetti	quadrupoli	sagnetti	quadrupoli
Disall. radiale	S	S	C	C	C	C	C	C	$\pm 0,1$ mm	$\pm 0,1$ mm	5 mm ²	$1,5 \cdot 10^2$ mm
Disall. verticale	S	S	C	C	C	C	C	C	$\pm 0,1$ mm	$\pm 0,1$ mm	0,05 mm	$1,5 \cdot 10^2$ mm
Disall. azimutale	no	no	C	C	C	C	C	C	$\pm 0,1$ mm	$\pm 0,1$ mm	-	-
Rotazione attorno all'asse ottico	S	S	C	C	C	C	C	C	$\pm 2 \cdot 10^5$ rad	$\pm 2 \cdot 10^5$ rad	$2,8 \cdot 10^4$ rad	$5 \cdot 10^5$ rad
Rotazione attorno all'asse radiale	no	no	C	C	C	C	C	C	$\pm 2 \cdot 10^5$ rad	$\pm 2 \cdot 10^5$ rad	-	-
Rotazione attorno all'asse verticale	no	no	C	C	C	C	C	C	$\pm 2 \cdot 10^4$ rad	$\pm 2 \cdot 10^4$ rad	-	-
Fluttuazione lunghezze azimutali	C	C	no	no	no	no	no	no	-	-	$\pm 0,1$ mm	$\pm 0,1$ mm
Errori di gradiente (indice di campo)	S	S	no	no	no	no	no	no	-	-	2,8%	1%

C = errore casuale

S = errore sistematico

* L'effetto di questo errore sistematico può essere compensato agendo sulle correnti di alimentazione.

TAB. III

gia propria degli anelli di accumulazione. Poiché la larghezza quadratica media della distribuzione relativa di energia in un fascio a 750 MeV, è pari a circa 6×10^{-4} , e diminuisce linearmente al diminuire dell'energia, occorre che il valore medio dell'energia dei fasci sia stabile entro limiti analoghi.

Dal punto di vista del funzionamento della macchina, sarebbero invece ammissibili dei limiti più larghi, ma comunque non molto superiori a 10^{-3} ; all'iniezione occorre infatti che l'orbita corrispondente al valore medio dell'energia del fascio proveniente dall'iniettore non si sposti di più di qualche mm dalla posizione corrispondente all'ottimo per il rendimento di iniezione.

Per i gruppi alimentanti i quadrupoli sarebbe sufficiente una stabilizzazione all'1%, cui corrisponde una stabilizzazione delle frequenze di oscillazione di betatrone radiale e verticale all'incirca uguale all'1%; in pratica anche questi gruppi avranno una stabilizzazione migliore, a 10^{-3} , rientrando essa nella tecnica normale.

Il modo più conveniente per realizzare i tre generatori è di ricorrere a gruppi rotanti motore asincrono-dinamo piuttosto che a raddrizzatori statici.

Col primo sistema le variazioni di frequenza della rete si ripercuotono in variazioni di tensione sul lato corrente continua, mentre le variazioni di tensione di rete vengono attenuate di un fattore pari all'inverso dello scorrimento del motore asincrono, e cioè pari a circa $40 \div 50$; col secondo sistema le variazioni di tensioni di rete si ritrovano sul lato continua, mentre quelle di frequenza in prima approssimazione non hanno effetto sul lato continua.

Poiché le variazioni di frequenza di rete sono lente, mentre quelle di tensione possono essere anche rapide, la potenza di regolazione necessaria per ottenere la stabilizzazione voluta sul lato corrente continua risulta assai minore ed i tempi di regolazione più brevi col primo sistema che col secondo.

I tre generatori saranno montati su due gruppi rotanti così costituiti:

- 1) a) Motore asincrono 650 KVA - 3 KV
b) Dinamo 550 KW, 550 V - 1.000 A - stabilizzata in corrente a $\pm 2 \times 10^{-4}$
- 2) a) Motore asincrono 150 KVA - 3 KV

- b) Dinamo 60 KW, 200 V - 300 A stabilizzata in corrente a 10^{-3}
- c) Dinamo 45 KW, 150 V - 300 A stabilizzata in corrente a 10^{-3}
- d) Dinamo 10 KW - eccitatrice della dinamo da 550 KW.
- e) Alternatore 20 KVA - 400 o 1000 Hz per il sistema di stabilizzazione.

La regolazione della corrente erogata dai due generatori che alimentano i quadrupoli, è fatta in modo che tale corrente sia proporzionale alla corrente circolante nel magnete in modo da mantenere invariate le condizioni di foccheggiamento al variare dell'energia dei fasci; il coefficiente di proporzionalità può essere variato in un certo intorno per cambiare le condizioni di foccheggiamento.

Il sistema di stabilizzazione della corrente è costituito da un alternatore a 400 o 1000 Hz, collegato a un sistema di stabilizzazione della tensione, che a sua volta è collegato a un sistema di stabilizzazione della corrente.

Il sistema di stabilizzazione della corrente è costituito da un sistema di stabilizzazione della tensione, che a sua volta è collegato a un sistema di stabilizzazione della corrente.

Il sistema di stabilizzazione della corrente è costituito da un sistema di stabilizzazione della tensione, che a sua volta è collegato a un sistema di stabilizzazione della corrente.

Il sistema di stabilizzazione della corrente è costituito da un sistema di stabilizzazione della tensione, che a sua volta è collegato a un sistema di stabilizzazione della corrente.

Il sistema di stabilizzazione della corrente è costituito da un sistema di stabilizzazione della tensione, che a sua volta è collegato a un sistema di stabilizzazione della corrente.

- a) Dinamo 550 KW, 200 V - 300 A stabilizzata in corrente a 10^{-3}
- b) Dinamo 10 KW - eccitatrice della dinamo da 550 KW.
- c) Alternatore 20 KVA - 400 o 1000 Hz per il sistema di stabilizzazione.

4) IL PROGRAMMA DELLE MISURE MAGNETICHE

1) I modelli

Allo scopo di stabilire le caratteristiche definitive dei magneti curvanti e dei quadrupoli per Adone, è in corso di attuazione un programma di misure magnetiche su modelli.

Sono attualmente disponibili:

- un modello in scala 1:2 del magnete curvante; per renderne meno laboriosa la costruzione, questo magnete, invece di avere un raggio di curvatura di 1.25 m in corrispondenza dell'orbita di equilibrio, è diritto (raggio di curvatura ∞).
- un modello in scala 1:1 del quadrupolo F.

In entrambi i modelli è prevista la possibilità di cambiare le espansioni polari; per il quadrupolo è prevista la possibilità di inclinare diversamente gli assi dei poli, in modo da ridursi al caso di quadrupolo convenzionale con zona utile circolare anziché ellittica.

Il programma delle misure prevede una prima serie di controlli atti a porre in evidenza eventuali errori di dimensionamento dei giochi e delle testate. Vengono quindi eseguite essenzialmente misure di flusso: entro il ferro, facendo rilievi in diverse sezioni del circuito magnetico; in aria, attorno alle testate del magnete ed ai giochi del quadrupolo.

Questo primo tipo di misure non richiede una precisione elevata.

Vengono prelevati i segnali di tensione indotti, da una variazione nota del campo, entro alcune spire avvolte intorno alla zona del circuito magnetico in esame, ed inviati ad un flussometro elettronico.

Con questo metodo possono ricavarsi le curve campo-corrente relative a diverse sezioni del ferro in esame.

Con metodo analogo, facendo uso di bobine sonda del tipo adatto a misure puntuali, possono ricavarsi informazioni sull'entità e l'andamento del flusso disperso, attorno a particolari zone, come le testate del magnete ed il ritorno laterale dei quadrupoli.

2) Grandezze da misurare

Un secondo ciclo di misure prevede l'analisi dei parametri magnetici più importanti.

Questi sono, per il magnete:

a) controllo del valore dell'indice di campo, n , definito dalla relazione:

$$n = - \frac{\partial B_z}{\partial R} \frac{R}{B_z}$$

b) Localizzazione della superficie luogo dei punti ove è nulla la componente radiale del campo (superficie magnetica mediana).

c) Controllo dell'andamento azimutale della componente verticale del campo.

d) Misura della lunghezza magnetica effettiva, cioè della lunghezza curvante che agisce realmente sulle particelle.

Per il quadrupolo:

a) Misura del gradiente del campo, G , definito dalla relazione:

$$G = \frac{\partial B_y}{\partial x} = - \frac{\partial B_x}{\partial y}$$

Sul modello a configurazione ellittica occorre effettuare una serie piuttosto complessa di misure di gradiente, estesa a tutto un quadrante della zona compresa tra i poli. Essendo infatti il quadrupolo ellittico del tutto nuovo per noi attualmente, è interessante ottenere una mappa completa del gradiente, per controllare il profilo dei poli, l'inclinazione dei poli stessi, e per determinare con precisione la zona utile.

b) Misura della lunghezza magnetica.

Questa è generalmente maggiore della lunghezza meccanica del singolo elemento, ma la differenza tra le due non è valutabile con precisione a priori.

c) Determinazione degli assi magnetici e del centro ottico del quadrupolo.

Queste misure sono necessarie per definire il posizionamento e l'orientamento del quadrupolo in sede di montaggio dell'anello.

3) Strumenti e criteri di misura

Gli strumenti di misura di cui si intende fare uso sono essenzialmente di due tipi:

a) Flussometro elettronico di Dicke.

b) Tecnica delle peacking-strips.

Il primo tipo può venire usato per misure di campo, di

flusso, di gradiente, e per la determinazione delle lunghezze magnetiche.

Per misure che richiedono una sensibilità elevata, quali la determinazione della s.m.m. per il magnete, e la localizzazione degli assi del quadrupolo, vengono realizzate delle sonde differenziali a peacking-strips.

I criteri di misura seguiti dipendono dalla grandezza in esame.

Per misure di campo e di flusso, la sonda del flussometro è costituita da una bobinetta, la quale viene sottoposta ad una variazione di flusso ottenuta o mediante rotazione della bobina stessa, oppure operando una variazione della corrente di eccitazione.

Per misure (puntuali) di gradiente nel quadrupolo, e di "n" nel magnete, la bobina sonda viene spostata secondo la direzione che compete al tipo di misura.

Per misure di lunghezza magnetica, essendo questa grandezza proporzionale all'integrale del campo, la sonda è costituita da una bobina lunga, tale da abbracciare sia il campo all'interno che quello all'esterno dell'elemento in esame.

Uno spostamento od una rotazione di tale bobina dà luogo ad una misura di tipo integrale e fornisce direttamente il valore della lunghezza magnetica rispettivamente del quadrupolo o del magnete.

Si sta studiando la possibilità di realizzare delle sonde differenziali utilizzando la tecnica delle peacking-strips, per effettuare le misure atte a localizzare la s.m.m. e gli assi ottici del quadrupolo. Sonde di questo tipo sono infatti assai sensibili a piccole differenze di campo ed è attualmente in esame la possibilità di farne uso a campi non troppo bassi.

Tutti i diversi tipi di sonda vengono sorretti da uno speciale coordinatometro, che può essere sfruttato per le diverse misure. Esso è infatti costituito da una parte inferiore, che consente spostamenti lungo i tre assi coordinati mediante tavole a croce; su di essa possono venire montate due parti distinte che consentono gli spostamenti della sonda necessari per misure di "n" e di gradiente.

Per le misure integrali, il coordinatometro può essere modificato in modo da poter sorreggere e guidare la bobina lunga.

Le letture degli spostamenti nelle varie direzioni pos

sono essere effettuate con comodità al mezzo decimo di millimetro, grazie ad un sistema di nonii decimali.

Gli spostamenti calibrati necessari per misure di "n" e di gradiente vengono realizzati mediante un sistema ad aria compressa.

5) L'INIETTORE

L'iniettore per Adone deve essere in grado di accumulare i due fasci di elettroni e positroni richiesti, e cioè 100 mA (corrispondenti a circa $1,3 \times 10^{11}$ particelle) per fascio, in un tempo breve rispetto alla vita media dei fasci stessi.

Per la durata utile del processo di accumulazione si è assunto il valore di un'ora. La vita media, a 10^{-9} mm di Hg, dovrebbe essere di 25-30 ore, e quindi il tempo di accumulazione è sufficientemente breve rispetto alla vita media; non conviene abbreviarlo ulteriormente, perchè gli inevitabili tempi morti (avviamento del Linac, passaggio da accelerazione di elettroni ai positroni, etc.) saranno dello stesso ordine di grandezza (15'-30'), e quindi il vantaggio non sarebbe sensibile. D'altro canto riteniamo non sia conveniente aumentarlo, per non rendere troppo gravosi i tempi morti dell'anello; ad ogni guasto, sia pur breve, degli impianti (magnete, RF, etc.) che provochi la perdita dei fasci, occorre infatti ripetere il processo di accumulazione.

L'iniezione degli elettroni e positroni nell'anello verrà ottenuta per mezzo di un deflettore impulsato per un tempo di tre-quattro giri; tenuto conto della efficienza di cattura da parte della RF e del numero di giri che si possono iniettare per impulso, si può dire che l'incremento di corrente circolante per impulso di iniezione è pari all'incirca al valore della corrente di picco delle particelle provenienti dall'iniettore, contenute in una banda di energia del $\pm 0.5\%$ e con emittanza inferiore od uguale a 10^{-3} cm rad. La corrente che soddisfa a tali condizioni verrà indicata come "corrente utile".

Tra due impulsi successivi deve trascorrere un tempo tale da permettere un sufficiente smorzamento delle oscillazioni di betatrone dell'ultimo impulso iniettato; esso si porterà quindi abbastanza lontano dal deflettore, verso l'orbita di equilibrio principale, così da non essere apprezzabilmente perturbato dal campo disperso del deflettore, quando esso venga nuovamente alimentato.

Questo tempo risulta dover essere compreso tra 1.5 e 2 costanti di tempo di smorzamento delle oscillazioni di betatrone; nel seguito considereremo il valore maggiore, cioè due costanti di tempo.

Fissato il tempo di accumulazione in un determinato anello per uno dei due fasci, ad esempio per i positroni, risulta fissata una grandezza caratteristica dell'iniettore da noi

chiamato fattore di merito, e cioè il prodotto dell'energia per la radice cubica della corrente utile da esso accelerata.

Ciò dipende dal fatto che la costante di tempo di smorzamento è inversamente proporzionale al cubo dell'energia e che il numero di impulsi da accumulare è inversamente proporzionale alla corrente utile.

Come detto nella "Proposta per la realizzazione di un anello di accumulazione per elettroni e positroni da 1.5 GeV"⁽⁷⁾, l'iniettore per Adone deve soddisfare alle esigenze più sopra formulate per l'anello da 1,500 GeV. Ciò significa, per le strutture magnetiche da noi considerate, che il suo fattore di merito deve essere di almeno $1.5 \text{ GeV} (\mu\text{A})^{1/3}$, cui corrisponde un tempo di accumulazione di 30' per fascio.

Un esame delle macchine acceleratrici che soddisfino tali requisiti porta a preferire l'acceleratore lineare nei confronti di macchine circolari. Ragioni economiche consigliano, per l'accelerazione dei positroni, di ricorrere ad un acceleratore lineare composto di due parti distinte con diverse caratteristiche: la prima accelera un intenso fascio di elettroni ad energia relativamente bassa (65 MeV), che viene fatto urtare su un convertitore dello spessore di circa una lunghezza di radiazione; una piccola frazione dei positroni prodotti viene accettata nella seconda parte ed accelerata sino all'energia finale.

Nel primo tratto la struttura del Linac è tale da permettere l'accelerazione di forti correnti di elettroni (0.4 A); il secondo tratto invece permette carichi più modesti (0.05÷0.1A), e la struttura è tale da dare il massimo incremento di energia con bassi valori di potenza a microonde.

Un Linac di questo tipo che dia il fattore di merito voluto per i positroni, a maggior ragione permetterà di ottenerlo per gli elettroni; togliendo infatti il convertitore, si può accelerare lungo tutto il Linac una corrente di elettroni compatibile con le caratteristiche del secondo tratto e certamente maggiore della corrente di positroni.

Poiché l'accelerazione di positroni è il problema più importante da risolvere, consideriamolo più in dettaglio.

Sull'efficienza di conversione elettroni-positroni in convertitori spessi non vi sono molti dati sperimentali; vi sono delle misure per energie dei primari sino a 30 MeV⁽⁸⁾, ma i risultati assoluti sono piuttosto incerti perchè le caratteristiche dell'analizzatore usato non erano note con sufficiente

accuratezza. Più recenti misure eseguite ad Orsay⁽⁹⁾, per energie dei primari da 55 MeV a 220 MeV, sembrano essere abbastanza accurate. Da tutte queste misure si ricava che il massimo per la densità centrale (attorno alla linea di volo dei primari) dei positroni di energia vicina all'energia critica del convertitore (circa 10 MeV) si ha per spessore del convertitore di circa una lunghezza di radiazione. In fig.16 sono riportati i risultati delle misure citate; l'efficienza è espressa per unità di potenza del fascio di elettroni incidente, in quanto si può assumere, in prima approssimazione, che le difficoltà ed il costo siano proporzionali alla potenza piuttosto che all'intensità del fascio incidente. Da queste misure si può vedere che conviene avere la conversione ad energie piuttosto elevate, nell'intorno dei 60-100 MeV. La scelta del valore più conveniente in questa regione dipende da fattori di costo, dalle difficoltà connesse col convertitore (per questo conviene, a pari potenza del fascio di elettroni, avere maggiore energia e minore corrente, perchè diminuisce così l'energia lasciata nel convertitore), dalle dimensioni che si possono ottenere per il fascio di positroni in uscita dal convertitore.

Per un calcolo accurato della corrente dei positroni, occorre conoscere le distribuzioni angolare e laterale della densità della sorgente; la distribuzione angolare non ha, in realtà, eccessiva importanza, una volta nota la densità centrale, perchè l'angolo solido accettato è molto piccolo rispetto all'apertura della distribuzione. Sarebbe invece abbastanza importante conoscere la distribuzione laterale; nessuna informazione, nè teorica nè sperimentale, è oggi disponibile su questo argomento. E' in programma un calcolo numerico assai laborioso, da eseguirsi sulla IBM 7090 del Centro di Ispra, che ci dovrà dare le informazioni necessarie.

Dopo il convertitore conviene porre una lente con distanza focale abbastanza piccola, che adatti l'emittanza della sorgente di positroni all'accettanza del Linac. Lungo tutta la guida acceleratrice del secondo tratto viene poi montato un solenoide il cui campo magnetico assiale permette di mantenere entro le dimensioni delle iridi della guida stessa positroni con momento trasverso abbastanza elevato (nel nostro caso sino a 0.35 MeV/c).

In uscita dal convertitore lo spettro di energia dei positroni si estende dalle bassissime energie sino, all'incirca, all'energia dei primari; occorre quindi decidere qual'è la banda di energia più conveniente per l'iniezione nel secondo tratto del Linac.

Il sistema magnetico accetta una certa banda di momenti trasversi ed una certa banda percentuale di energia dei positroni.

L'efficienza di conversione sarà quindi proporzionale all'intensità effettiva accelerata, qualora venga espressa in positroni per elettrone incidente per cento di energia per (momento trasverso)²; l'efficienza in queste unità è proporzionale a quella nelle usuali unità (positroni per elettrone per MeV per steradiante) divisa per l'energia dei positroni.

Dalla fig. 17, nella quale è riportata una delle curve di efficienza di conversione ottenute a Orsay⁽⁹⁾, si può vedere che l'energia più conveniente per i positroni è assai spostata verso i bassi valori (minori di 10 MeV); anche in questa considerazione la distribuzione laterale, certamente più larga per i positroni di bassissima energia, potrebbe spostare il risultato. In mancanza di informazioni più precise, i calcoli di corrente accelerata sono stati fatti assumendo di accettare positroni di energia intorno ai 10 MeV.

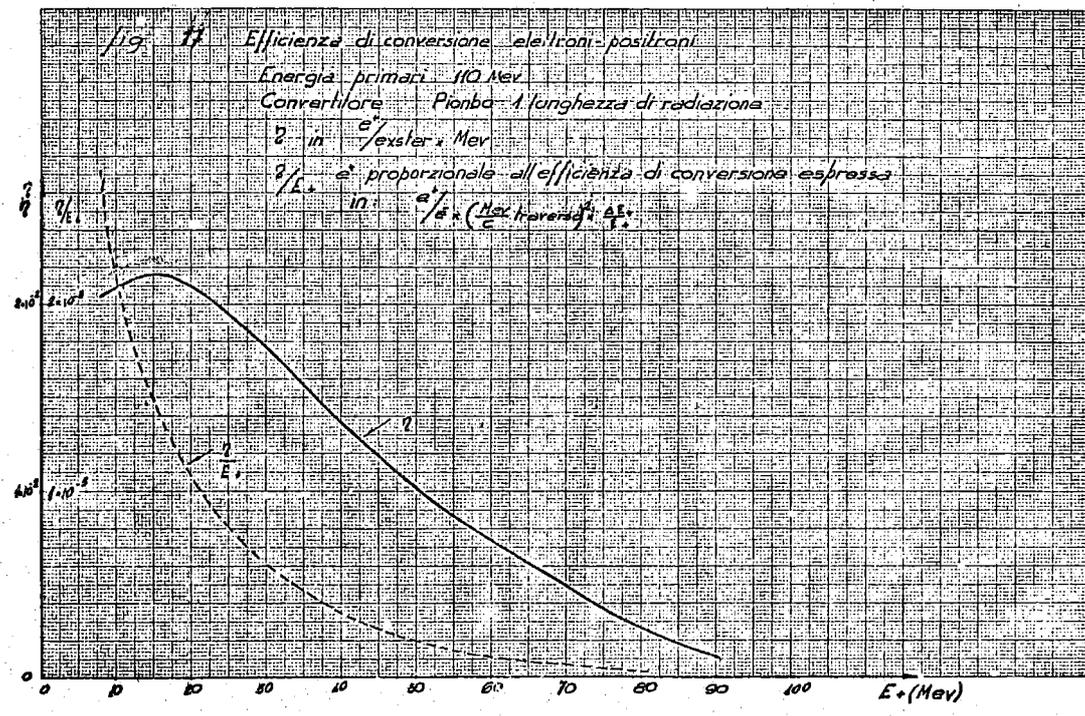
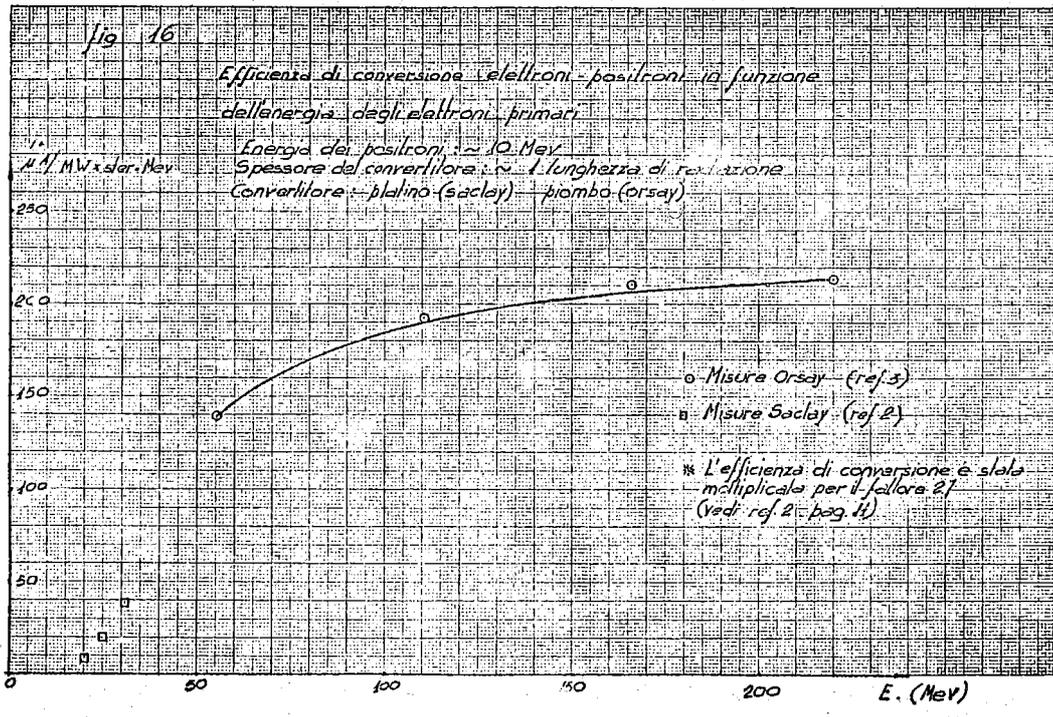
Prendendo i valori di Orsay⁽⁹⁾ per l'efficienza di conversione, con un'energia dei primari di 65 MeV ed una corrente di elettroni di 0.4 A di picco, nell'ipotesi di sorgente puntiforme e senza tener conto né di effetti di secondo ordine nella distribuzione del campo magnetico dei solenoidi (gli effetti di bordo sono considerati nell'approssimazione di lente sottile) né di disallineamenti, per le correnti totali di positroni accelerate si ottengono i valori indicati nella tabella I.

B_1 e B_2 sono i valori di campo magnetico assiale rispettivamente nella lente di adattamento e nel solenoide lungo il secondo tratto di acceleratore.

Il diametro interno minimo delle iridi della guida acceleratrice è di 2.1 cm; mancano però dati sul diametro utile per l'accelerazione del fascio di positroni. Prendendo come diametro utile 1 cm si è probabilmente pessimisti, ma ciò dovrebbe compensare anche gli altri effetti trascurati.

Il valore probabile della corrente totale di positroni accelerata è quindi di $500 \mu\text{A}$ di picco; la corrente utile, e cioè la frazione contenuta nell'1% di spread di energia e con emittanza minore od eguale a 10^{-3} cm rad., sarà compresa tra 100 e $200 \mu\text{A}$.

Assunto come valore di corrente utile $100 \mu\text{A}$, l'energia del fascio di positroni, perchè il fattore di merito sia maggiore od uguale a $1.5 (\mu\text{A})^{1/3}$ GeV, deve essere maggiore od uguale



FIGG. 16 - 17

a 325 MeV.

Nella tabella II sono raccolte le caratteristiche principali dell'acceleratore lineare iniettore di Adone; esso è in via di ordinazione presso una ditta per conto del Consiglio Nazionale delle Ricerche. Esso non sarà impiegato solo come iniettore, ma se ne prevede l'uso per la sperimentazione diretta coi fasci di positroni ed elettroni da esso accelerati. L'alta frequenza di ripetizione è prevista appunto per la sperimentazione diretta.

TABELLA I

Correnti totali di positroni (valori di picco).

Ipotesi: fascio primario 0.4 A a 65 MeV
 effic. di conversione $155 \mu\text{A}/\text{MW} \times \text{ster} \times \text{MeV}$
 sorgente puntiforme
 energia dei positroni: compresa tra 6 e 12 MeV
 approssimazione lineare, disposizione meccanica ideale

B_1 (K G s)	B_2 (K G s)	Diametro fascio accettato (cm)	Corrente totale di positroni (μA)
17,7	2,4	2	2.170
17,7	2,4	1	540
2,4	2,4	2	145
2,4	2,4	1	36

B_1 campo magnetico assiale nella lente di adattamento

B_2 campo magnetico assiale lungo il secondo tratto di Linac

TABELLA II

Caratteristiche principali dell'acceleratore lineare iniettore di Adone.

		Positroni	Elettroni
Energia max a corrente 0	(MeV)	360	440
Energia max a 100 mA (per elettroni)	"		375
Corrente totale di picco	(mA)	0,5	100
Corrente utile di picco	"	0.1±0.2	25
Durata max impulso fascio	(μsec)		3.2
Frequenza massima di ripetizione (alla durata max)	(Hz)		250

6) L'OTTICA DI INIEZIONE

1) Introduzione

Il sistema ottico di iniezione deve essere in grado di trasportare due fasci, uno di positroni, l'altro di elettroni, dall'uscita dell'acceleratore lineare fino al rispettivo deflettore, soddisfacendo determinate condizioni, imposte dalla necessità di rendere massimo il rendimento d'iniezione.

Queste condizioni sono:

a) Completa acromaticità del sistema di trasporto; questo significa che non devono esistere, per le particelle trasportate, correlazioni tra la loro energia all'ingresso del sistema e la loro inclinazione e il loro scostamento, rispetto alla traiettoria principale, nel punto d'iniezione.

b) Completa afocalità del sistema; non deve cioè esistere alcuna dipendenza tra lo scostamento e l'inclinazione delle particelle in uscita e, rispettivamente, l'inclinazione e lo scostamento all'ingresso. In altre parole, lo scostamento finale non deve essere legato alla inclinazione iniziale; lo stesso dicasi per la inclinazione finale rispetto allo scostamento iniziale.

c) Ingrandimento prefissato.

Un tale sistema viene usualmente indicato come sistema telescopico.

2) La geometria del sistema

In origine è stata esaminata la possibilità di realizzare separatamente i due canali di iniezione costituenti il sistema di trasporto; questo perchè a causa della posizione obbligata dell'acceleratore lineare, essi non possono essere eguali. Infatti, per consentire un eventuale prolungamento dell'acceleratore lineare, è necessario che Adone si trovi lateralmente rispetto all'asse dell'acceleratore; ciò impedisce di realizzare due fasci identici e simmetrici rispetto a tale asse.

La realizzazione di due canali completamente separati si è dimostrata, ad un attento esame, di più ardua realizzazione e più dispendiosa della soluzione attualmente considerata.

Questa è schematicamente illustrata nella fig.18.

Da essa si vede che i due canali sono perfettamente sovrapposti per circa due terzi del percorso totale.

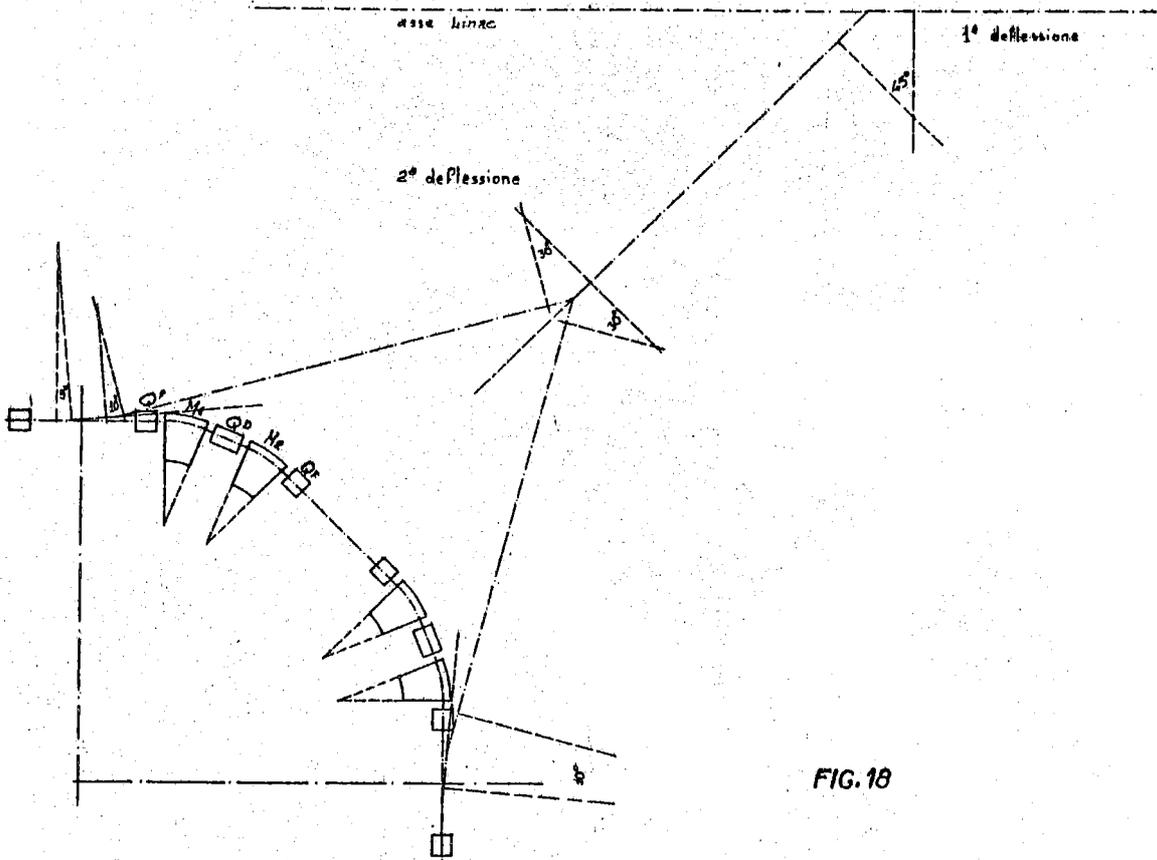


FIG. 18

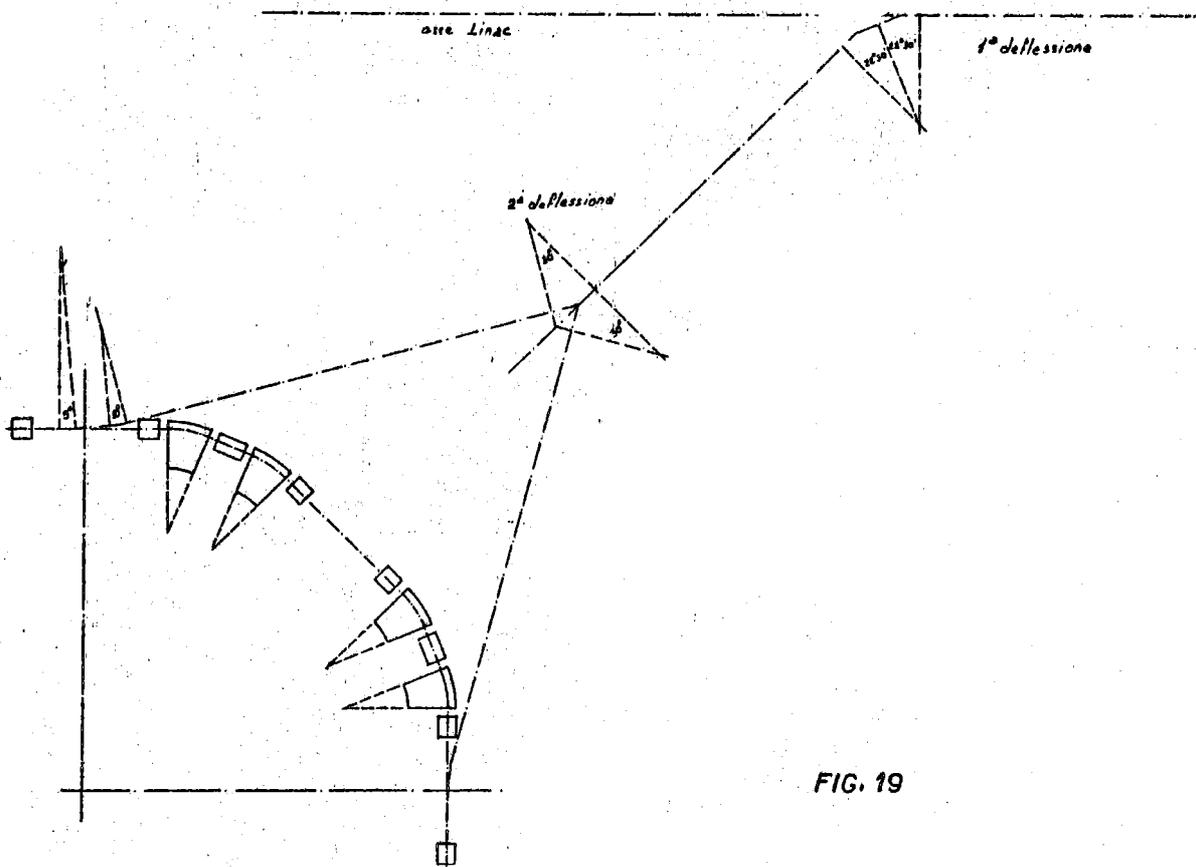


FIG. 19

Lo schema adottato è stato preferito ad altri possibili, per diverse ragioni: insieme ad un notevole risparmio di materiale, la soluzione di alcuni problemi connessi alla realizzazione delle condizioni indicate in precedenza è risultata semplificata; ciò perchè con particolari accorgimenti è stato possibile trattare i due sistemi sovrapposti come un unico sistema, con conseguente dimezzamento delle difficoltà di carattere sia matematico che di progetto.

3) L'acromatismo

Nel grado di approssimazione in cui ci si è posti, gli unici elementi che introducono correlazioni energetiche sono i magneti deflettori.

Per ottenere l'acromatismo si può procedere secondo due vie diverse. Si può correggere globalmente il cromatismo di tutto il sistema; oppure correggere separatamente il cromatismo dei singoli elementi.

Se si adotta la prima soluzione i due sistemi non possono più trattarsi come uno solo, bensì vanno analizzati distintamente; la loro sovrapponibilità diviene allora una condizione veramente stringente.

Infatti il sistema di quadrupoli necessario a realizzare la afocalità non può essere posto nella zona compresa tra la prima e la seconda deflessione, per non pregiudicare le condizioni di acromatismo; esso va dunque spostato tra l'acceleratore lineare ed il primo magnete, allungando così il percorso delle particelle da trasportare.

Di conseguenza si è pensato ad un'altra soluzione più comoda e più rispondente alle nostre esigenze, il cui schema è illustrato nella fig.19.

In questa soluzione si rende acromatica ciascuna delle due parti in cui si può pensare separato uno dei due canali. Considerando come prima parte quella comprendente la prima deflessione, e come seconda quella comprendente le altre, risulta da considerazioni matematiche che una volta rese acromatiche le due parti separatamente, tutto il canale risulta acromatico.

A ciò si aggiungano i due seguenti vantaggi: tra le due parti può venire inserito il sistema di quadrupoli necessario a realizzare la afocalità del sistema, senza con questo pregiudicare le condizioni di acromatismo.

Inoltre qualora si adotti questa soluzione, basta ana-

lizzare un solo canale, in quanto per l'altro varranno le stesse considerazioni, poichè per quel che riguarda il cromatismo introdotto nella prima parte, i due canali sono identici, mentre sono simmetrici per il cromatismo della seconda parte.

Come si può vedere dalla fig.19, i due fasci subiscono la prima deflessione in due fasi successive, tramite due elementi curvanti eguali. Il sistema costituito da essi e dal quadrupolo compreso è totalmente acromatico.

Lo schema di questo primo sistema acromatico è illustrato in fig.20.

I due magneti M_{11} e M_{12} sono ad ingresso ed uscita normali, con indice n diverso da zero; il quadrupolo Q_5 è foccheggiante radialmente; esso agisce sulle traiettorie di momento diverso da quello principale, compensando la dispersione introdotta da M_{11} , in modo da rendere nulla la dispersione totale del sistema.

Un'indagine parametrica è stata programmata allo scopo di scegliere, tra le varie soluzioni, quella che a valori fisicamente realizzabili per l'indice "n" e per la distanza focale della lente unisca la possibilità di mantenere entro limiti accettabili le dimensioni orizzontali e verticali del fascio trasportato.

La seconda parte del sistema trasporta i due fasci fino alle rispettive zone d'iniezione. Lo schema è visibile in fig.21. Il magnete M_2 produce una deflessione di segno opposto a seconda delle particelle trasportate: qui avviene infatti la separazione dei due canali, che restano però eguali dopo il magnete.

Per ognuno dei due si ha un'altra deflessione di piccola entità, ad opera del magnete M_3 , necessaria per tenere i due fasci lontani il più possibile dai flussi dispersi esistenti nella zona prossima all'iniezione.

La deflessione finale è prodotta dai deflettori pulsanti ed è quella che pone sull'orbita le particelle.

L'iniezione: deflettore, M_3 , Q_4 , Q_3 , Q_2 , Q_1 , M_2 costituisce un sistema ottico completamente acromatico.

La scelta tra le possibili soluzioni ottenute mediante elaborazione alla 1620 IBM, viene fatta seguendo il criterio di mantenere piccole le dimensioni massime del fascio.

Il magnete M_2 è a poli piani, con uscita del fascio non normale.

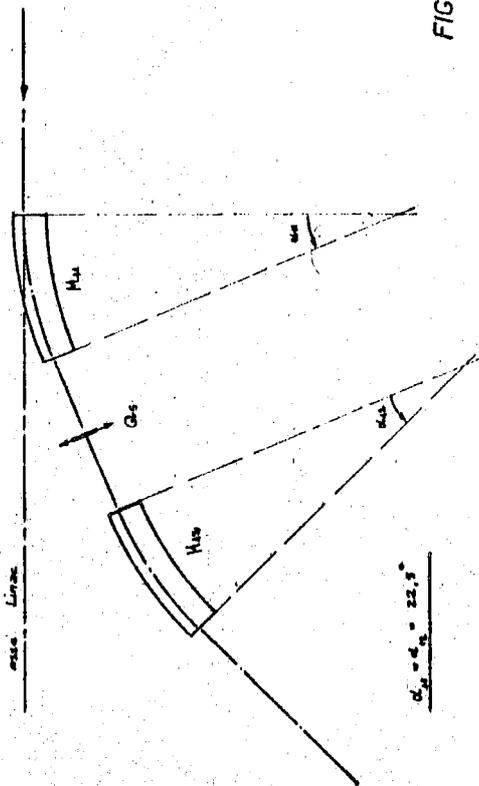


FIG. 20

$$\alpha_2 = \alpha_{10} = 22,5^\circ$$

- $\alpha_2 = 30^\circ$; $P_2 = 4.25 \text{ m}$; $\beta_2 = 16^\circ$.
- $\alpha_3 = 10^\circ$; $P_3 = 2.00 \text{ m}$.
- $\alpha_4 = 5^\circ$; $P_4 = 1.3 \div 1.5 \text{ m}$.

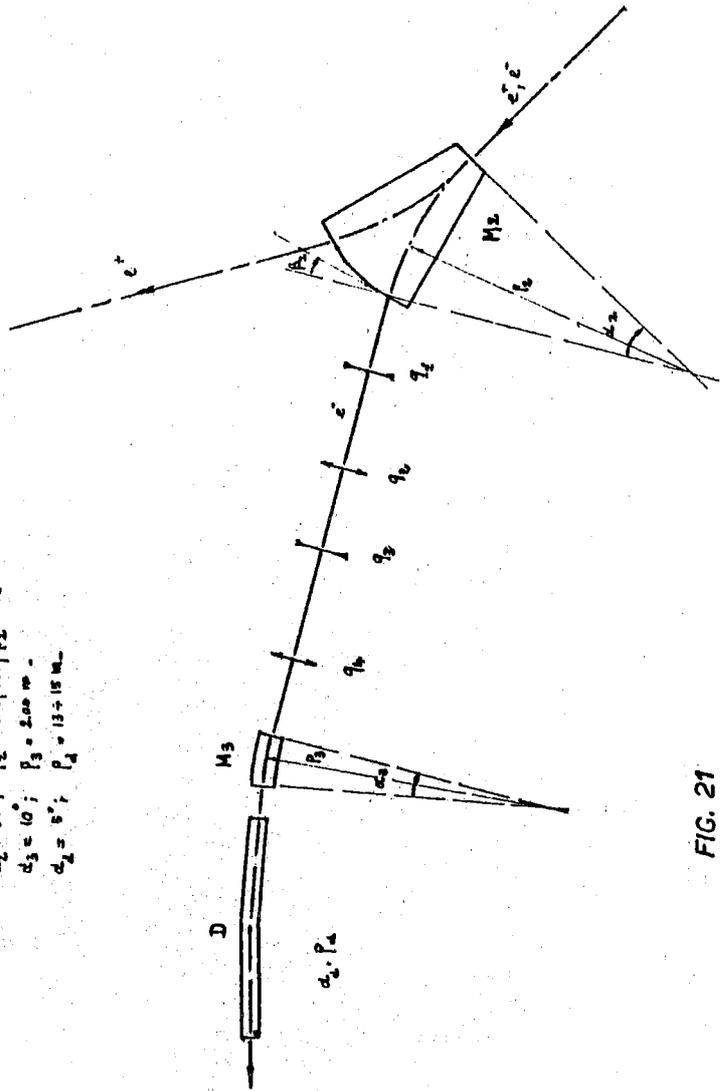


FIG. 21

I quadrupoli hanno distanze focali dell'ordine dei 2 metri, e sono alternativamente focheggianti e defocheggianti. Il magnete M_3 è a poli piani, con ingresso ed uscita normali.

4) L'afocalità

Avendo scisso il sistema in due parti separatamente acromatiche, si può inserire tra di esse un insieme di lenti che rendono afocale il tutto.

Esso non pregiudica le condizioni di acromatismo in quanto comprende unicamente dei quadrupoli.

Questo sistema è attualmente in fase di definizione, essendo in corso una elaborazione alla 1620 IBM per la ricerca delle soluzioni del problema.

Il numero delle lenti verrà scelto in modo da realizzare la completa afocalità del sistema impedendo che il fascio assuma dimensioni eccessive.

5) Il sistema di adattamento

Ha lo scopo di effettuare il migliore adattamento tra emittanza del fascio ed accettazione dell'anello, per rendere massimo il rendimento d'iniezione.

La situazione è differente a seconda che si tratti dell'accettazione radiale o di quella verticale.

Caso verticale: le ellissi di accettazione ed emittanza sono concentriche. In questo caso il migliore adattamento si ottiene imponendo la condizione di similitudine tra di esse, dalla quale si ricava la seguente espressione per l'ingrandimento verticale

$$G_v = \sqrt{\frac{\beta_v w_v}{a_v}}$$

ove a_v è il semiasse (scostamento) dell'emittanza verticale w_v la sua area in unità di π β_v una funzione dell'ascissa curvilinea della macchina, la cui radice quadrata dà l'involuppo delle traiettorie.

Caso radiale: l'emittanza non è concentrica all'accettazione perchè l'orbita di iniezione si trova ad una certa distanza dall'orbita di equilibrio della macchina per evitare che le particelle già iniettate ritrovino sul loro percorso il campo del deflettore.

In questo caso non si può dare una forma semplice per l'ingrandimento che rende massimo il rendimento di iniezione; si può dire, in generale, che l'ingrandimento radiale sarà minore di quello verticale.

Nel calcolo dell'ingrandimento bisogna tener conto della limitazione posta dalle dimensioni della zona utile nel deflettore, che ha una sezione quadrata di circa 1 cm di lato; il fascio iniettato dovrà essere contenuto in questa zona.

Sull'emittanza del fascio dal Linac possono farsi le seguenti ipotesi (pessimiste):

$$\text{area emittanza } W = 10^{-3} \text{ cm x rad}$$

$$a = a_v = 1 \text{ cm}$$

Introducendo nella 1) il valore per il β verticale all'inizio del quadrupolo foccheggiante (dove termina il deflettore):

$$2) \quad \beta_v = 3.11 \text{ m}$$

si ottiene per l'ingrandimento verticale il valore

$$3) \quad G_v = 0.56$$

Questo valore darebbe una dimensione verticale totale di 11 mm, superiore alla dimensione della zona utile nel deflettore.

L'ingrandimento verticale dovrà quindi essere ridotto a

$$3') \quad G_v = 0.5$$

Anche se questo valore è diverso dall'ottimo, dato che l'ellisse di accettazione è sufficientemente più grande di quella dell'emittanza, tutte le particelle entranti dovrebbero essere accettate dall'anello.

L'accettanza verticale di questo, con diaframma di 20mm nel piano verticale, dovuto all'ingombro del deflettore, è in fatti

$$W = \frac{Y^2}{\beta} = \frac{1 \text{ cm}^2}{3.11 \text{ cm}} \approx 3.2 \cdot 10^{-3} \text{ cm x rad}$$

In tutti gli altri punti della macchina, l'accettanza verticale è maggiore o uguale a tale valore.

Per quel che riguarda il piano radiale, il valore ottimo di G_R è compreso tra 0.2 e 0.4.

Per aumentare il numero dei giri utili delle particelle iniettate, è preferibile che il centro dell'emittanza si trovi al di sotto dell'asse dell'accettanza: ciò significa che l'inclinazione media delle particelle iniettate rispetto alla orbita principale, deve essere, nel punto di iniezione, negativa. Questa situazione viene realizzata facendo in modo che la posizione finale dei deflettori possa venire regolata in fase di iniezione.

Il sistema di adattamento verrà posto tra l'uscita del Linac ed il primo magnete; è prevista per esso un'alimentazione separata dal resto, per poter modificare l'adattamento senza interferire con gli altri parametri della macchina.

Nella fig. 22 è illustrato lo schema finale dell'ottica di iniezione.

6) Alcuni elementi di progetto

Vengono ora riassunti alcuni dati relativi al progetto di uno dei quadrupoli e di uno dei magneti costituenti il sistema di trasporto.

Per il quadrupolo sono state fissate, in base ai risultati numerici delle elaborazioni eseguite, le seguenti caratteristiche ottiche:

distanza focale	$f = 2.0 \text{ m}$
lunghezza magnetica	$L = .25 \text{ m}$
raggio cerchio di gola	$a = 3 \text{ cm}$

Caratteristiche tecniche:

profilo scarpe polari:	circolare
raggio profilo	$R = 1.15 a = 34.5 \text{ mm}$
larghezza polo	$E = 2 a = 60 \text{ mm}$
lunghezza meccanica	$l = 200 \text{ mm}$
gradiente di campo	$G = 330 \text{ gs/cm}$

(L'impulso delle particelle trasportate è assunto essere $P = 400 \text{ MeV/c}$)

forza magnetomotrice	$NI = 1200 \text{ Asps/polo}$
corrente di eccitazione	$I = 100 \text{ A}$
avvolgimenti	12 spire/bobina
conduttore	$\text{quadro rame } 10 \times 10 \text{ mm}^2 \text{ } \varnothing 5$

sezione netta rame : 80 mm^2
densità di corrente : $j = 1,25 \text{ A/mm}^2$
lunghezza spira media : 64 cm
resistenza bobina : $R_b = 2,10^{-3} \text{ } \Omega / \text{bobina}$
potenza bobina : $W_{b1} = 20 \text{ watt/bobina}$
potenza quadrupolo (4 bobine in serie) : $W_q = 80 \text{ watt}$.

I dati seguenti si riferiscono al magnete M_{11} (fig.20) il quale ha le seguenti caratteristiche ottiche:

- ingresso ed uscita normali
- indice di campo polo: $n = + 4,5$
- angolo di deflessione: $\alpha_{11} = 22,5^\circ$
- raggio di curvatura : $\rho_{11} = 1,70 \text{ m}$

Caratteristiche tecniche:

profilo poli : iperbolico ($R_0/n = 37,8 \text{ cm}$)
larghezza polo (testa ta) : 11 cm
larghezza giogo : 11 cm
larghezza gamba ritorno : 11 cm
lunghezza sull'orbita principale : 67 cm
campo massimo : $B_0 = 7,85 \text{ Kgs}$
dimensioni zona utile : $5 \times 5 \text{ cm}^2$
forza magnetomotrice totale : $NI = 32,10^3 \text{ Asp.}$
corrente di eccitazione : $I = 267 \text{ Ampere}$
avvolgimento bobina : 60 spire/bobina
conduttore : quadro rame $10 \times 10 \text{ mm}^2 \text{ } \phi 5$
sezione netta rame : 80 mm^2
densità di corrente : $3,33 \text{ A/mm}^2$
lunghezza spira media : $\sim 2 \text{ m}$
resistenza bobina : $R_b = 3,15 \times 10^{-2} \text{ } \Omega / \text{bobina}$
potenza bobina : $W_b = 2,2 \text{ Kwatt/bobina}$
potenza magnete : $W_m = 4,4 \text{ KW}$

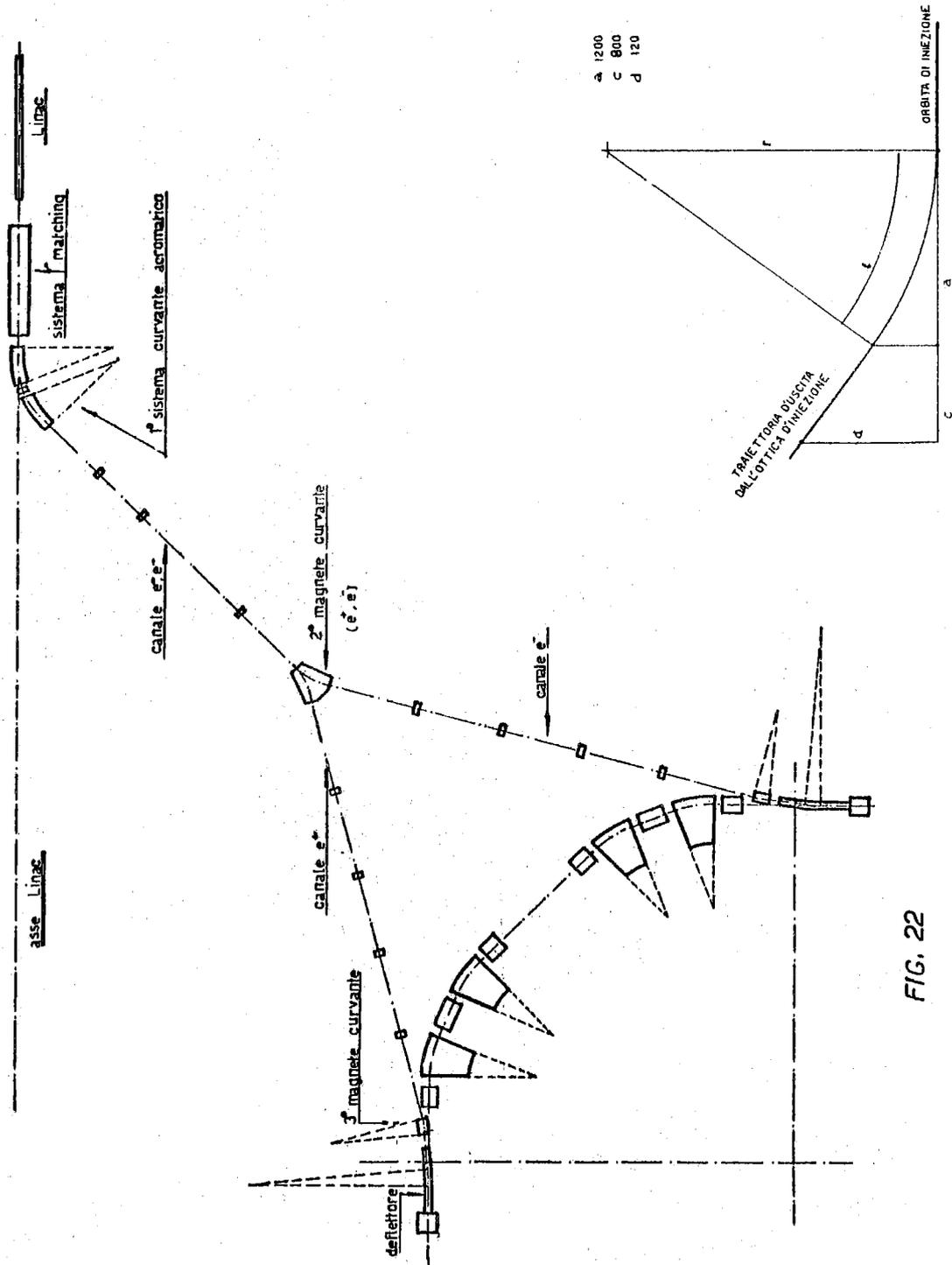


FIG. 22

FIG. 23

7) IL DEFLETTORE

Prestazioni richieste

Per iniettare gli elettroni e i positroni nell'anello di accumulazione sono necessari due deflettori distinti posti in due sezioni diritte diverse della macchina; questi deflettori sono però strutturalmente simili per il fatto che sia il fascio di positroni che quello di elettroni hanno all'incirca la stessa energia. Potremo quindi eseguire il calcolo considerando i soli positroni. In fig.23 sono riportate le caratteristiche della deflessione che si deve realizzare.

Lo scostamento della traiettoria del fascio, in uscita dall'ottica di iniezione, dall'orbita di iniezione, deve essere di 120 mm a una distanza di 2 m dal punto in cui la traiettoria di iniezione è tangente all'orbita di iniezione, mentre lo spazio utile per il deflettore vero e proprio è di circa 1,2 m. Da questi dati si ricavano, con semplici considerazioni geometriche e tenendo presente la già citata fig.23, il raggio di curvatura e la lunghezza del deflettore, che sono:

$$r \approx 14 \text{ m}$$

$$l \approx 1,2 \text{ m}$$

Ciò significa che, per ottenere la deflessione, si deve avere nella zona di deflessione di lunghezza l o un campo elettrico giacente nel piano r, l e normale alla traiettoria o un campo magnetico normale al piano r, l , o, infine, una combinazione di entrambi.

Detto $p = 400 \frac{\text{MeV}}{c}$ il momento dei positroni che si vogliono iniettare, si ha subito che nel caso si voglia effettuare la deflessione usando il solo campo elettrico che abbiamo detto e che indichiamo con E_r , questo deve valere:

$$E_r = \frac{pc}{er} \approx 2,75 \cdot 10^7 \text{ V/m}$$

mentre nel caso si voglia effettuare la deflessione usando solo il campo magnetico, che indichiamo con B_z , si ha:

$$B_z = \frac{p}{er} \approx 9,5 \cdot 10^{-2} \text{ Wb/m}^2 = 950 \text{ gauss}$$

La prestazione però che rende estremamente difficile la realizzazione del deflettore è dovuta al fatto che, dopo un certo numero di giri effettuati nella macchina dalle prime par-

ticelle iniettate e prima che esse si portino sulla traiettoria di equilibrio, esse ripassano dentro il deflettore stesso e pertanto, per non perdere le particelle iniettate, è necessario annullare il campo deflettente in un tempo molto breve; in pratica lo "spegnimento" deve avvenire in un tempo dell'ordine di 100 ± 200 n. sec.

Ciò implica l'uso di deflettori impulsati, tali cioè che rimangano "accesi" per un periodo di tempo predeterminato ed il cui "spegnimento" avvenga quanto più rapidamente possibile a un'istante prefissato.

Sempre dal fatto che, come è stato detto, le particelle iniettate nella macchina ripassano dentro il deflettore stesso, è determinata la ovvia richiesta che la parete del deflettore verso l'interno della camera a vuoto della macchina sia aperta. Ciò comporta un problema di campo disperso verso l'interno della ciambella stessa; esso deve essere quanto più piccolo possibile in corrispondenza dell'orbita di equilibrio per non provocare le perdite delle particelle già accumulate.

Descrizione del deflettore

Consideriamo la linea il cui schema di principio è riportato in fig. 24.

I conduttori indicati con A e B sono rispettivamente in parallelo e le piastre "a" sono collegate ai conduttori A, mentre le piastre "b" sono collegate ai conduttori B.

Una tale linea è in prima approssimazione schematizzabile con una linea del tipo di fig. 25 in cui le capacità C sono le capacità formate dai piatti "a" e "b" affacciati e le induttanze L sono le induttanze delle coppie di conduttori A e B affacciate che, in prima approssimazione, non vengono perturbate dalle capacità aggiunte. Per una linea di questo tipo è difficile la valutazione dei valori corretti di L e di C per poter dare i parametri della linea e cioè:

$$z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad \tau = \sqrt{LC} \quad f_c = \frac{1}{\pi \sqrt{LC}}$$

dove con z_0 , τ e f_c sono stati indicati rispettivamente l'impedenza caratteristica, il ritardo proprio e la frequenza di taglio della linea. Ci si deve perciò limitare a calcolare gli ordini di grandezza di L e C e dimensionare la linea eseguendo misure su modelli in scala 1:1. Ma prima di parlare di questo vogliamo brevemente descrivere il principio di funzionamen

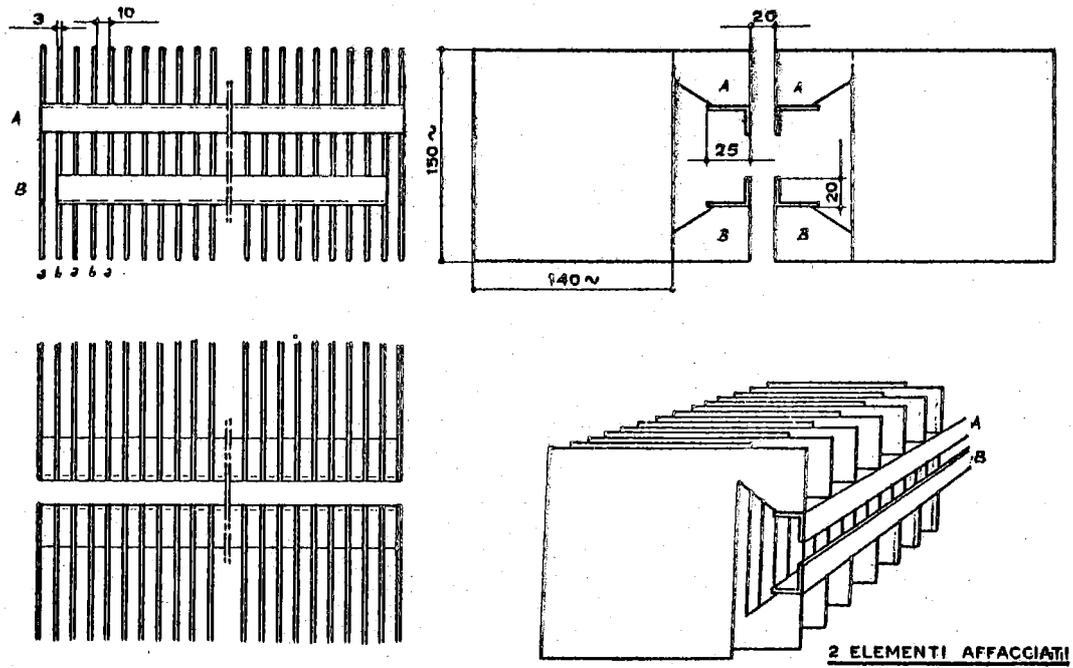


FIG. 24

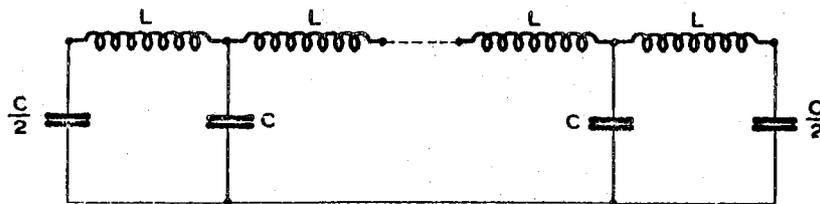


FIG. 25

to di questo deflettore. Supponiamo di chiudere ad un estremo la linea di fig. 24 sulla sua impedenza caratteristica e di alimentarla all'altro estremo tra i conduttori A e B con un impulso rettangolare di tensione di ampiezza V_0 e durata qualsiasi.

Questo impulso si propagherà lungo la linea dissipando infine l'energia ad esso associata sul carico di chiusura. Durante la propagazione si stabilirà tra i conduttori A e B un campo elettrico E_0 , proporzionale a V_0 e normale alla velocità di propagazione dell'impulso e inoltre, associato ad esso, si stabilirà un campo magnetico B_0 normale ad E_0 e alla velocità di propagazione dell'impulso, la cui ampiezza sarà proporzionale ad $i_0 = \frac{V_0}{Z_0}$.

Ne discende che una particella carica che abbia la velocità diretta come la velocità di propagazione dell'impulso viene deflessa dai due campi elettrico e magnetico associati all'impulso di tensione e nell'ipotesi che gli elettrodi della linea abbiano lo stesso raggio di curvatura della traiettoria della particella, per cui il campo elettrico sia sempre normale alla traiettoria stessa, la deflessione avviene senza che il campo elettrico debba compiere nessun lavoro. In particolare si vede che la velocità della particella deve essere diretta nel verso opposto della velocità di propagazione dell'impulso se si considera che le forze agenti sulla particella siano concordi.

La disposizione dei conduttori è determinata in base al requisito che i campi elettrico e magnetico deflettenti debbano essere uniformi entro l'1% in una zona di 10 mm di diametro intorno all'asse del deflettore.

Per arrivare al dimensionamento della struttura elettrica del deflettore che, allo stato attuale delle cose, è ritenuta definitiva, è stato necessario costruire due modelli di deflettore in scala 1:1⁽¹⁰⁾ sui quali sono state eseguite numerose misure per ottenere le informazioni necessarie al dimensionamento della struttura attuale^(*); inoltre sono state eseguite numerose misure in vasca elettrolitica⁽¹¹⁾, per studiare un buon compromesso tra zona utile di deflessione e valore massimo del campo deflettente nella zona utile di deflessione.

Ottenuti questi dati il criterio di progetto è stato

(*) - E' in preparazione una nota interna dove verranno riportate tutte le misure più significative eseguite sui modelli di deflettore.

di ottenere il miglior compromesso tra potenza di picco massima, tensione massima necessaria per ottenere la deflessione, impedenza caratteristica (e quindi parametri della linea) e zona utile di deflessione tecnicamente realizzabili.

Con riferimento alle notazioni della fig.26 le dimensioni meccaniche e i parametri elettrici del deflettore cui si è giunti, sono i seguenti:

- $l_t \approx 1,2$ m (lunghezza totale della linea)
- $s = 3 \cdot 10^{-2}$ m
- $a = 10^{-2}$ m
- $b = 2 \cdot 10^{-2}$ m
- $c = 5 \cdot 10^{-3}$ m
- $h = 2 \cdot 10^{-2}$ m
- $L = 0,44$ AH
- $C = 44400$ pF (capacità totale di carico della linea costituita dai piatti "a" e "b" di fig.24)
- $Z_0 \approx 10$ ohm
- $\tau \approx 44$ nsec

Detta I la corrente che si propaga lungo la linea e B_{zt} il massimo valore assunto del campo magnetico deflettente nella zona utile, valore che è stato corretto per tener conto dell'effetto del campo elettrico associato, si ha:

$$\frac{I}{B_{zt}} \approx 9,8 \text{ A/gauss}$$

il che corrisponde a una corrente di 9.300 A e quindi a una tensione di 93 KV per ottenere il campo richiesto di 950 Gauss.

Le piastre che costituiscono la capacità C risultano essere 95 coppie di piastre di dimensioni 150 x 150 mm e di spessore 3 mm distanziate di 10 mm alternativamente collegate ai conduttori A e B fig.24. Tutto il deflettore dovrà essere contenuto in un apposito contenitore collegato direttamente alla camera a vuoto della macchina con un vuoto dell'ordine di 10^{-9} mm di Hg. In questa sede non prendiamo in esame tutti i problemi tecnologici connessi alla realizzazione del deflettore sotto vuoto.

Il sistema d'alimentazione

Lo schema a blocchi del sistema d'alimentazione è riportato in fig.27.

Un alimentatore di potenza, ad alta tensione, carica attraverso una resistenza di protezione una linea di ritardo

SCALA 1:1

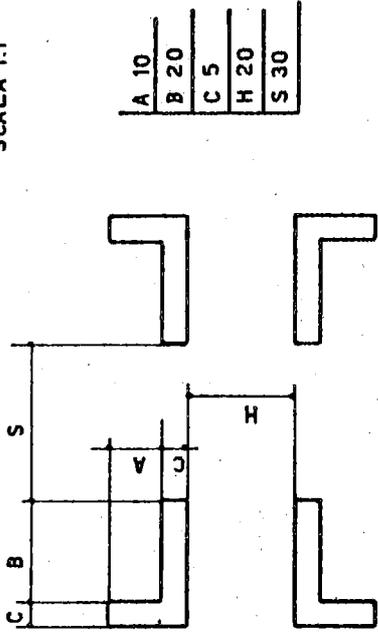


FIG. 26

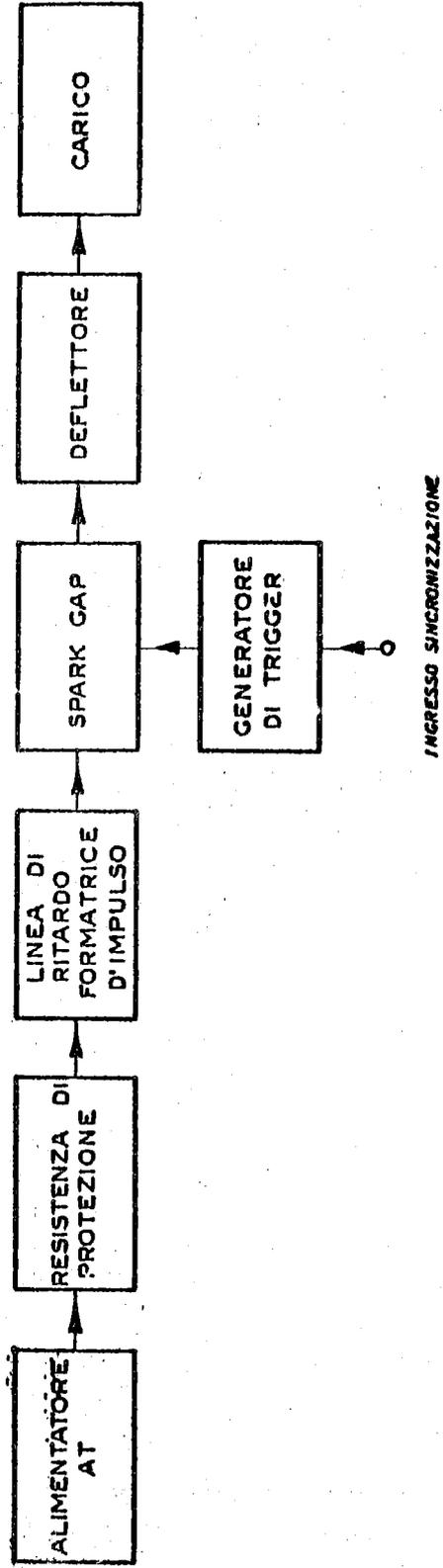


FIG. 27

formatrice d'impulso che ha la stessa impedenza caratteristica Z_0 del deflettore. Quando all'ingresso del circuito di sincronizzazione giunge l'impulso di comando, il formatore di Trigger comanda la spark-gap che si "accende" e la linea formatrice d'impulso si scarica sul deflettore che è chiuso sulla sua impedenza caratteristica, generando un impulso rettangolare la cui ampiezza massima è metà della tensione di carica della linea, la cui durata è doppia del ritardo proprio della linea stessa ed infine il cui tempo di salita e discesa è determinato dai parametri propri della linea.

Riportiamo quindi brevemente le prestazioni cui devono soddisfare i vari componenti dell'impianto nell'ipotesi che la frequenza di ripetizione degli impulsi sia $f_r = 5 \text{ Hz}$ e la loro durata $1,2 \mu \text{ sec}$.

a) Il carico: può essere costituito da una o più resistenze in parallelo, con la condizione che l'impedenza totale parallela sia puramente resistiva e pari a $R = Z_0 = 10 \Omega$.

Deve inoltre essere in grado di sopportare una tensione di picco assunta cautelativamente maggiore di \sim il 7% di quella necessaria ad effettuare la deflessione; assumiamo cioè:

$$V_p = 100 \text{ KV}$$

cui corrisponde una potenza di picco fluente lungo il deflettore:

$$W_p \approx 1000 \text{ MW}$$

e una potenza media

$$W_p^* \approx 6 \text{ KW}$$

b) La spark-gap e il circuito di Trigger

La spark-gap dev'essere dimensionata in modo da poter tenere sia tra i suoi elettrodi che verso massa la tensione $V_L = 200 \text{ KV}$; deve poter portare, col ciclo di ripetizione voluto, una corrente di picco:

$$i_p = \frac{V_p}{R} = 10.000 \text{ A}$$

deve avere una vita corrispondente ad almeno 10^4 impulsi, senza la necessità di aggiustamenti della superficie degli elettrodi (10^4 impulsi corrispondono a ~ 5 cariche complete dello anello).

L'induttanza propria della spark-gap deve essere molto piccola e infine la somma del jitter del generatore di Trig

ger, con quello della spark-gap, non deve superare la decina di nanosecondi.

c) La linea di ritardo formatrice d'impulso può essere costituita da un cavo coassiale d'impedenza caratteristica $Z_0 = 10 \Omega$, che possa essere caricato alla tensione $V_L = 200 \text{ kV}$ e di lunghezza tale che il suo ritardo proprio sia $\tau_{r1} = 0,6 \mu\text{sec}$, e cioè circa 150 m.

d) La resistenza di protezione deve essere tale da permettere una efficiente protezione dell'alimentatore e la ricarica della linea col ciclo di ripetizione voluto, si ha quindi, detto R^* il valore della resistenza di protezione e ponendo la costante di tempo di carica pari a $\frac{1}{20}$ del periodo di ripetizione:

$$R^* = \frac{1}{20} \cdot \frac{Z_0}{\tau_{r1}} \approx 165 \text{ k}\Omega$$

Questa resistenza deve poter avere applicata ai suoi capi la tensione $V_L = 200 \text{ kV}$ e deve essere isolata verso massa per la stessa tensione, mentre la potenza media che dev'essere in grado di dissipare è data da:

$$W^{**} = \int_0^{\tau_{r1}} \frac{V_L^2 e^{-\frac{2t}{R^* \tau_{r1}}}}{R^*} dt = \frac{V_L^2 \tau_{r1}}{2 R^*} (1 - e^{-\frac{2\tau_{r1}}{R^* \tau_{r1}}}) \approx 6 \text{ kW}$$

e) L'alimentatore deve poter erogare la potenza massima di 12 kW con una tensione di 200 kV.

Come ovvio la potenza è data dalla somma delle potenze dissipate nel circuito. Inoltre dev'essere in grado di erogare la corrente di picco,

$$I = \frac{V_L}{R^*} \approx 1,2 \text{ A}$$

La tensione dev'essere regolabile con continuità da 100 a 200 kV e dev'essere stabilizzata contro le variazioni nel tempo entro $\pm 1,5\%$.

Il progetto esposto, chiaramente di massima, deve essere sviluppato dal punto di vista tecnologico, mentre i dati numerici riportati sono abbastanza cautelativi in vista delle prestazioni richieste.

8) L'IMPIANTO DI VUOTO

Introduzione

Il sistema da vuoto dell'anello di accumulazione deve essere in grado di raggiungere e mantenere una pressione media nella ciambella minore o, al più, uguale a 10^{-9} torr. Tale ordine di grandezza, richiesto da considerazioni teoriche sullo scattering e sulla bremsstrahlung nel gas residuo da parte dei positroni e degli elettroni costituenti i fasci, è circa mille volte più basso di quello necessario nelle macchine acceleratrici di tipo convenzionale. Bisogna quindi ricorrere alle tecniche dell'ultravuoto.

I sistemi di pompaggio per ottenere vuoti così spinti sono essenzialmente due e sono basati rispettivamente su:

- a) pompe a diffusione con trappole ad aria liquida
- b) pompe getter.

Come è stato accennato prima, una volta raggiunta la pressione voluta in tutta la camera da vuoto è estremamente importante mantenerla. Infatti una qualsiasi perturbazione in fase di accumulazione o in fase di sperimentazione può distruggere i fasci circolanti o diminuire le loro intensità irrimediabilmente e questo, per un anello tipo Adone, significa ricominciare dall'inizio le operazioni di accumulazione con ritardi di tempo dell'ordine di ore.

Questa è la ragione principale che ci ha fatto scartare il primo sistema di pompaggio, con pompe a diffusione. Attraverso queste pompe infatti la camera da vuoto è in comunicazione con l'ambiente e una qualsiasi interruzione della corrente di alimentazione costituisce un serio pericolo per le condizioni di vuoto preesistenti. Inoltre con questo sistema è indispensabile usare delle trappole ad aria liquida che richiedono una gravosa manutenzione e un alto costo di esercizio senza poter evitare una certa contaminazione d'olio.

Per contro le pompe getter non presentano inconvenienti di questo tipo. Il sistema camera da vuoto-pompe è in questo caso un sistema chiuso e la mancanza di trappole e la piccola potenza assorbita dalle pompe durante il funzionamento rendono minimo il costo di esercizio. Per questi motivi abbiamo scelto per evacuare la ciambella Adone un sistema di pompe al Titanio che sarà descritto in dettaglio nelle pagine seguenti.

Infine per garantire una assoluta pulizia della camera

da vuoto abbiamo scelto come pompe preliminari delle pompe turbomolecolari con le quali effettuare il degassamento.

1) Descrizione della ciambella

L'anello di accumulazione è formato da otto parti uguali (periodicità otto). Ciascun ottante è costituito da un tratto dritto a sezione circolare e da un tratto curvo a sezione quasi ellittica, detti per semplicità "sezione dritta" e "sezione curva". Le dimensioni (vedi disegno n.28) sono le seguenti:

Tratto dritto	diámetro	220 mm
	lunghezza	2,5 m
	spessore	2,5 mm
Tratto curvo	perimetro sezione	470 mm
	area sezione	140 cm ²
	lunghezza	4,7 m
	spessore	3 mm

La lunghezza di un ottante è quindi 7,2 m. Il materiale adoperato nella costruzione della ciambella è acciaio inossidabile amagnetico AISI 304.

2) Trattamento dei materiali

La necessità di raggiungere pressioni al di sotto di 10^{-9} torr. richiede che i materiali costituenti il recipiente da montare siano sottoposti ad un trattamento speciale che ora descriveremo in breve.

La ciambella viene montata collegando insieme, con flange, gli ottanti, i quali hanno già subito il seguente trattamento:

- lavaggio con solvente e per via elettrolitica,
- degassamento a 400°C per due giorni sotto vuoto,
- riempimento di idrogeno fino alla pressione atmosferica dopo aver raggiunto un vuoto con pompe al titanio dell'ordine dei 10^{-10} torr.

Dopo di ciò gli ottanti vengono aperti ed esposti all'aria per quanto tempo si vuole.

Le prove eseguite in laboratorio hanno dimostrato che il trattamento all'idrogeno qui descritto permette, rimettendo i pezzi sotto vuoto, di raggiungere pressioni nel campo dei 10^{-10} torr. in un tempo breve e soprattutto con un riscaldamento moderato (130° - 150°C per circa 3 h).

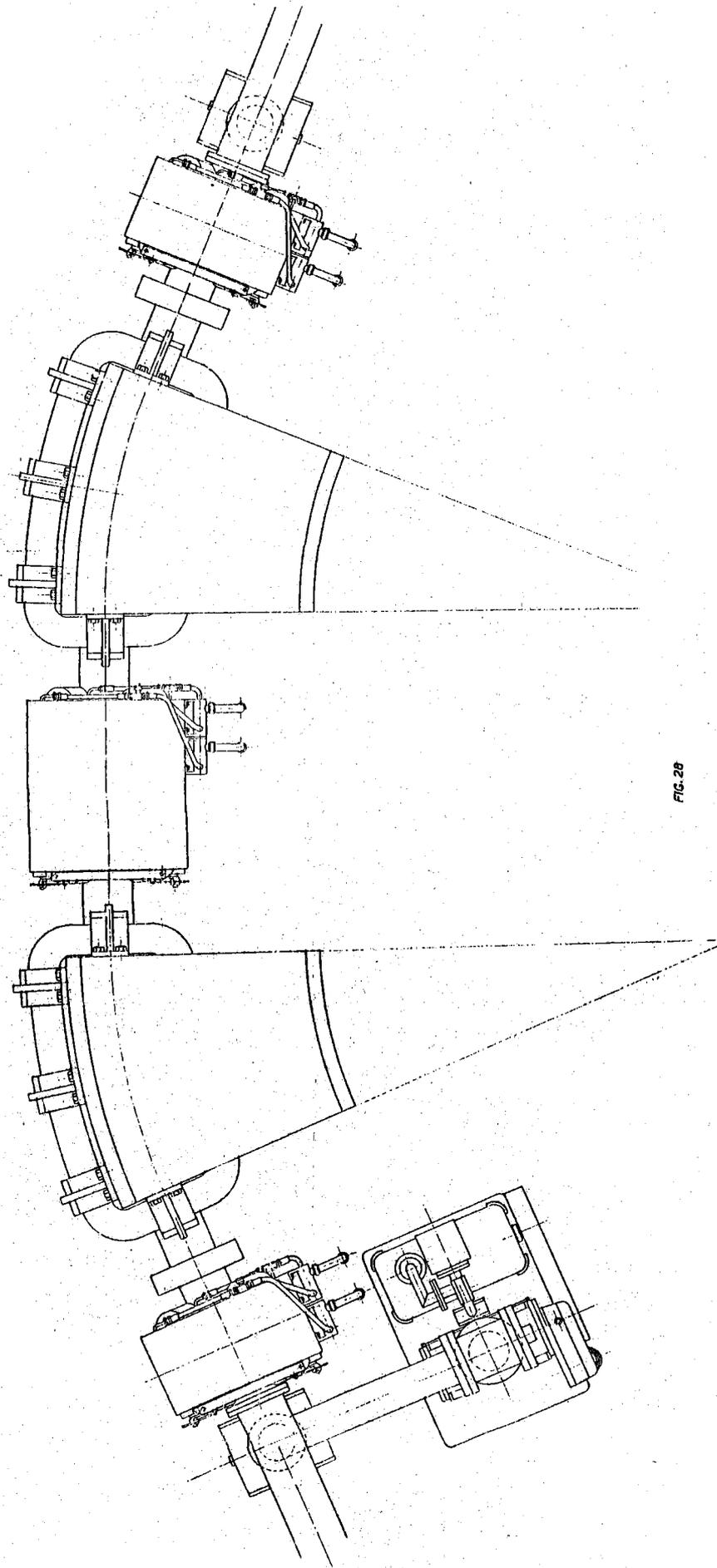


FIG. 20

Tutto ciò costituisce un notevole vantaggio in quanto i pezzi vengono trattati separatamente, e una volta che la camera da vuoto è montata, il degassamento eseguito a temperatura moderata semplifica l'isolamento termico e favorisce la durata delle resistenze dell'impianto di riscaldamento.

Il degassamento a 400°C ha come effetto la diminuzione del degassamento specifico q di un fattore $\sim 10^4$. Il valore di q alla temperatura ambiente dell'acciaio da noi usato è dell'ordine di $2 \cdot 10^{-8}$ torr.l/(cm². s). Prove di laboratorio hanno dimostrato che il trattamento descritto sopra riduce il degassamento specifico a 10^{-12} torr.l/(cm². s) o meno.

3) Calcoli di vuoto

a) Ciambella Adone

Le guarnizioni che intendiamo usare sono metalliche. Le pompe sono poste all'estremità dei tratti dritti. In questo modo ad ogni pompa corrisponde un sistema da vuoto costituito da metà sezione dritta e da metà sezione curva, quindi schematicamente il sistema è quello di fig. 29:

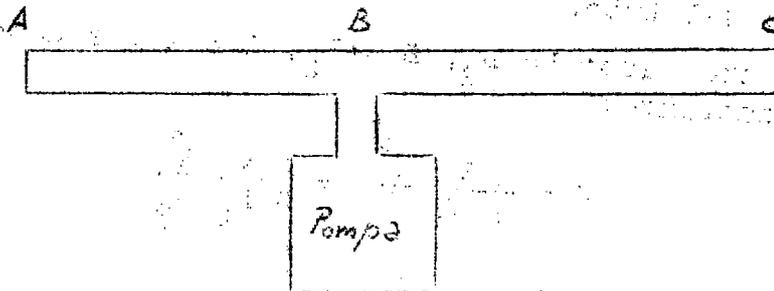


FIG. 29

Il tratto AB è metà sezione dritta, il tratto BC è metà sezione curva.

Tratto AB:

Lunghezza $L_1 = 125$ cm

Diametro int. $D_1 = 22$ cm

Tratto BC:

Lunghezza $L_2 = 235$ cm

Perimetro della sezione $P_2 = 47$ cm

Area della sezione $A_2 = 140$ cm

Conduttanza C_1 del tratto AB.

Si ha:

$$C_1 = 12,1 \frac{D}{L} = 1030,1 /s$$

Conduttanza C_2 del tratto BC.

Il tratto BC non ha una sezione geometricamente semplice (è all'incirca un'ellisse). Convienè quindi usare la formula più generale per il calcolo della conduttanza valida per una sezione di forma qualsiasi e variabile lungo la conduttura:

$$C = \frac{4 V_m}{3 \int_0^L \frac{B}{A^2} dl} \text{ cm}^3/s$$

- V_m = Velocità media delle molecole.
- B = Perimetro della sezione del tubo,
- A = Area della sezione del tubo,
- L = Lunghezza del tubo.

Nel nostro caso: $L = L_2$, $B = P_2$, $A = A_2$; e dato che la sezione A_2 è costante:

$$C = \frac{4 V_m A_2^2}{3 B L} = \frac{4 V_m A_2^2}{3 P_2 L_2}$$

Sapendo che $V_m = 4,59 \cdot 10^4$ cm/s, si ha

$$C = 108,6 /s$$

Fissiamo una pressione P_0 alla bocca della pompa pari a

$$P_0 = 5 \cdot 10^{-10} \text{ torr.}$$

La formula che dà la velocità di pompaggio S in funzione del degassamento specifico q è la seguente:

$$S = \frac{qA}{P_0}$$

indicando con A la superficie totale della camera da vuoto.
 A è la somma della superficie H_1 del tratto AB e H_2 del trat-

to BC. Si ha:

$$H_1 = 15,64 \cdot 10^3 \text{ cm}^2;$$

$$H_2 = 11,05 \cdot 10^3 \text{ cm}^2;$$

$$A = H_1 + H_2 = 19,7 \cdot 10^3 \text{ cm}^2$$

Assumendo un degassamento specifico $q = 5 \cdot 10^{-12}$ torr. l/cm² s si ha:

$$S = 197 \text{ l/s}$$

Si deve però tener conto della diminuzione della velocità di aspirazione di una pompa al diminuire della pressione, espressa dalla formula seguente:

$$S = S_p \left(1 - \frac{P_1}{P_0}\right)$$

Con S_p = velocità nominale della pompa, e p_1 = pressione limite alla bocca della pompa = $2 \cdot 10^{-10}$ torr. Si ha:

$$S_p = \frac{S}{1 - \frac{P_1}{P_0}} = 330 \text{ l/s}$$

Possano quindi andar bene pompe al titanio da 400 l/s. La velocità relativa alla sezione curva è

$$S_2 = \frac{q H_2}{P_0} = 110,5 \text{ l/s}$$

Per la sezione dritta:

$$S_1 = \frac{q H_1}{P_0} = 86,4 \text{ l/s}$$

Vediamo ora la pressione agli estremi della camera da vuoto.

La formula generale è:

$$P = P_0 + \frac{qH}{2C}$$

essendo H la superficie interna della porzione di camera da vuoto cui ci si riferisce e C la conduttanza.

Perciò all'estremo della sezione curva si ha:

$$P_2 = P_0 + \frac{q H_2}{2 C} = 5 \cdot 10^{-10} + 2,5 \cdot 10^{-10} \text{ torr.} = 7,5 \cdot 10^{-10} \text{ torr.}$$

In questo modo è soddisfatta la condizione di avere ovunque una pressione inferiore a 10^{-9} torr.

Con due pompe per ottante si ha un totale di 16 pompe al titanio da 400 l/s.

L'andamento della pressione lungo la ciambella è illustrato nella fig. 30.

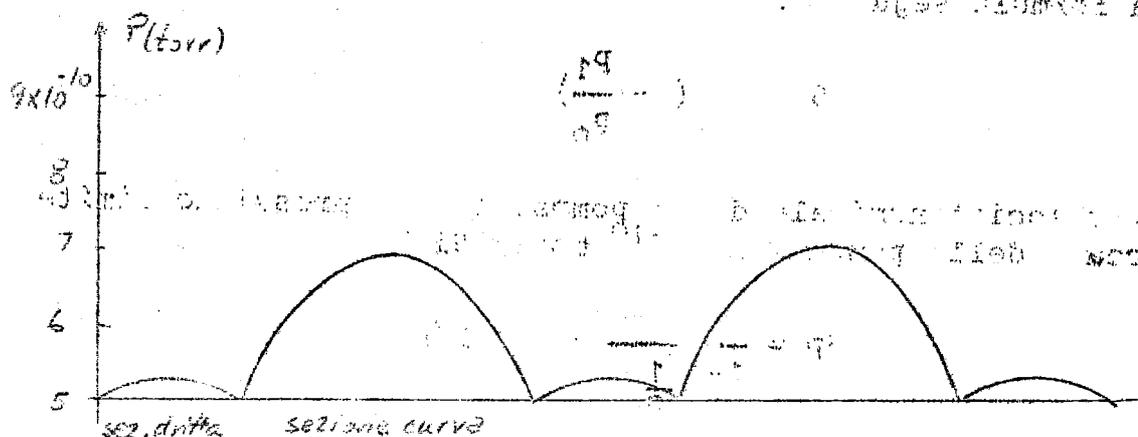


FIG. 30

Come si vede nella sezione dritta la pressione rimane molto bassa: praticamente rimane uguale alla pressione alla bocca della pompa ($5 \cdot 10^{-10}$ torr).

Il calcolo della pressione media raggiungibile in un ottante fornisce in queste condizioni il valore di

$$p = 6,1 \cdot 10^{-10} \text{ torr.}$$

Non è escluso che tale valore possa essere ulteriormente diminuito. Infatti i valori della pressione limite del degassamento specifico e delle velocità di pompaggio assunti per il calcolo sono abbastanza pessimistici e saranno sostituiti con quelli che otterremo con prove di laboratorio in parte già iniziate positivamente.

Il sistema complessivo sarà prevuotato da quattro pompe turbomolecolari da 140 l/sec che sembrano essere particolarmente adatte per un sistema di vuoto come il nostro perché hanno una velocità di aspirazione quasi costante fino oltre i 10^{-8} torr.

Per quanto riguarda quegli ottanti che comprendono le cavità a radiofrequenza si pensa che il sistema di vuoto descritto precedentemente sia sufficiente a garantire lo stesso ordine di grandezza della pressione come negli altri ottanti.

Il volume da evacuare non è essenzialmente diverso e i passanti ceramici, purché convenientemente predegassati, non presentano un degassamento specifico più alto di quello dello acciaio.

I due ottanti che comprendono i deflettori hanno invece volumi e relative superfici interne assai maggiori per la presenza dei deflettori a linea caricata capacitivamente.

Mancando a tutt'oggi dati precisi sulle dimensioni definitive rimandiamo questa parte di progetto ad un prossimo futuro. Comunque sarà studiato un sistema di pompaggio dimensionato in maniera da garantire la medesima pressione media di tutto il restante anello.

b) Iniezione.

Il sistema di iniezione è costituito dal raccordo tra il Linac e l'anello di accumulazione.

La forma di questo raccordo è mostrata nella fig. 31; si tratta di un tubo di acciaio inossidabile del diametro int. di 5 cm costituito da tre tratti: un tratto iniziale lungo 10 metri e due tratti da 8 metri ciascuno dopo la biforcazione.

Il tubo collega una camera da vuoto alla pressione di circa 10^{-6} torr. (Linac) ad una camera da vuoto a $6 \cdot 10^{-10}$ torr.

Il problema della caduta di pressione si può risolvere o con un'unica pompa alla fine del tubo o con un sistema differenziale del tipo di quello descritto nella nota LNF/int.-AD-62/2.

Nel disegno allegato è stato adottato quest'ultimo sistema. Si possono notare, subito prima della biforcazione, una pompa al titanio da 400 l/s completata da una prepompa turbomolecolare, e due sistemi differenziali, posti subito prima dei deflettori. Un sistema differenziale è costituito da 3 pompe al titanio da 60 l/s, secondo lo schema della fig. 32.

Immaginiamo di poter avere sulla prima pompa una pressione $p_1 = 10^{-7}$ torr. Richiediamo che sia $p_2 = 7 \cdot 10^{-9}$ torr. e $p_3 = 6 \cdot 10^{-10}$ torr. Dobbiamo calcolare la conduttanza e quindi la lunghezza dei tratti di tubo compresi tra le pompe (il diametro del tubo è $D = 3$ cm).

Troviamo prima la velocità di aspirazione effettiva delle tre pompe. La formula seguente dà la velocità alla pressione considerata p_0 :

$$S = S_p \left(1 - \frac{p_1}{p_0} \right)$$

Con $S_p =$ velocità nominale,

$S =$ velocità effettiva alla pressione considerata,

$p_1 =$ pressione limite = $2 \cdot 10^{-10}$ torr,

$p_0 =$ pressione alla bocca della pompa

Si ha:

per $p_0 = 10^{-7}$ torr. $S = S_0 = 60$ l/s

per $p_0 = 7 \cdot 10^{-9}$ torr. $S = 58$ l/s

per $p_0 = 6 \cdot 10^{-10}$ torr. $S = 40$ l/s

Dalla formula per la conduttanza:

$$Q = S_p = C \Delta p$$

si ricava:

$$C = \frac{S_p}{\Delta p}$$

Da cui:

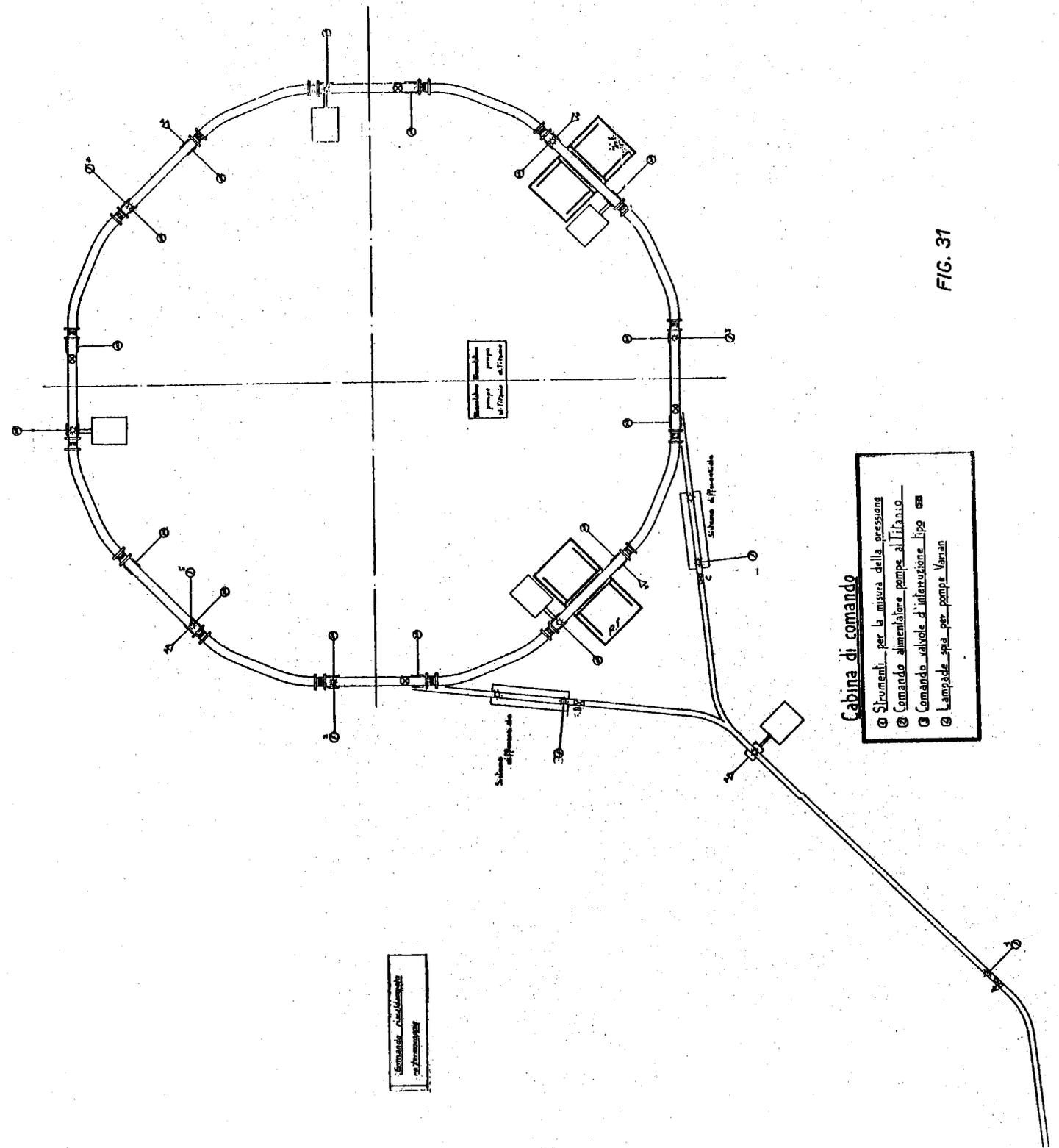
$$C_{12} = \frac{S_2 p_2}{p_1 - p_2} = 4,35 \text{ l/sec}$$

$$C_{23} = \frac{S_3 p_3}{p_2 - p_3} = 3,75 \text{ l/sec}$$

Con la formula

$$C = 12,1 \frac{D^3}{L}$$

si ricava per le lunghezze (trascurando gli effetti di bordo)



Sistemi differenziali

Sistemi differenziali

Cabina di comando

- 1 Strumenti per la misura della pressione
- 2 Comando alimentatore pompe al lifano
- 3 Comando valvole d'intervazione tipo
- 4 Lampade spia per pompe Varian

FIG. 31

alla fine della canalizzazione) quando il diametro è $D = 3$ cm:

$$L_1 = \frac{12,1 D^3}{C_1} = 75 \text{ cm} \quad L_2 = \frac{12,1 D^3}{C_2} = 87 \text{ cm}$$

Questi calcoli vanno bene se è valida la formula teorica della diminuzione con la pressione della velocità di aspirazione. In realtà sembra che la velocità di aspirazione cali più rapidamente: per questo sono in corso delle esperienze in laboratorio. Comunque sarà bene sovradimensionare il sistema, anche perché nel calcolo non si è tenuto conto del degassamento delle pareti che si aggiunge al carico sopportato dalle pompe. Si è trascurato il degassamento perché la superficie del tubo tra la prima e l'ultima pompa è piccola. Le prove di laboratorio, eseguite finora in modo rudimentale, hanno fornito un rapporto dell'ordine di 100 tra le pressioni iniziali e finali.

4) Realizzazione del sistema da vuoto, strumentazione e controlli.

Camera da vuoto

Oltre a quello che si è detto precedentemente il sistema da vuoto è completato da un certo numero di rubinetti, appositamente studiati, che permettono di separare una parte di ciambella lasciando il resto sotto vuoto. La posizione dei rubinetti è indicata nella fig.31. In questo modo l'intero sistema da vuoto è separabile in un certo numero di parti; naturalmente ogni parte è provvista di un rubinetto speciale, indicato sul disegno per il rientro dell'idrogeno. I rubinetti A, B e C (vedi disegno) saranno comandati elettricamente dalla cabina di comando.

Sistema di pompaggio

Come è detto al paragrafo 3 il sistema di pompaggio è costituito da 16 pompe al titanio, due agli estremi di ogni sezione dritta, e da 4 pompe turbomolecolari. Nella fig.31 si vedono la posizione e l'ingombro delle varie pompe.

Alimentazione delle pompe

Le pompe al titanio richiedono per funzionare una piccola potenza che è proporzionale alla pressione, come si vede dai dati seguenti:
tensione di alimentazione 7000 V,

corrente:

40 μ A	a	10^{-8} torr.
400 μ A	a	10^{-7} torr.
4 mA	a	10^{-6} torr.

Con le pompe turbomolecolari si spera di raggiungere una pressione limite di 10^{-8} torr. A questa pressione la corrente totale assorbita dalle 16 pompe è $40 \cdot 16 = 640 \mu$ A.

La potenza totale è $7 \cdot 10^3 \cdot 6,4 \cdot 10^{-4} = 4,5$ W.

Si pensa quindi di adoperare un unico alimentatore, collegando le pompe in parallelo. Dal resto anche alla pressione di 10^{-6} torr. la corrente totale è di 64 mA e la potenza di circa 450 W: un alimentatore con queste caratteristiche è facile da costruirsi e di piccolo ingombro.

Il complesso di alimentazione sarà costituito da due alimentatori, montati su un carrello mobile, e da un commutatore automatico che metta in funzione il secondo in caso di guasto del primo. Questo complesso sarà situato nella parte interna della ciambella.

L'accensione dell'alimentatore potrà essere fatta sul posto oppure dalla sala di comando. Eventualmente sempre in sala di comando si potrà mettere un amperometro per la misura della corrente totale assorbita dalle pompe.

Ciascun alimentatore è fornito di un relais che lo disinscrive quando la corrente, per una ragione qualsiasi, aumenta oltre i limiti consentiti. Occorre inoltre tener conto che una pompa potrebbe cominciare ad assorbire in un momento qualsiasi troppa corrente, sia per un improvviso rientro d'aria, sia per una diminuzione della sua resistenza di isolamento. Per questo è previsto su ogni pompa un amperometro (vedi la fig. 31) collegato ad un relais; quando la corrente sale, il relais stacca la pompa e contemporaneamente accende una lampadina spia nella sala controllo. Così si può individuare la pompa difettosa anche quando la macchina è in funzione e la radioattività ne impedisce una ispezione. La macchina poi può continuare a funzionare perché una pompa al titanio rimane attiva per alcune ore dopo che si è tolta l'alimentazione, e soprattutto perché le 16 pompe previste sono più che sufficienti ad assicurare una pressione inferiore a 10^{-9} torr.

Le pompe del sistema di raccordo tra Linac e ciambella, una da 400 l/s e due sistemi differenziali, hanno tutte un alimentatore proprio (vedi disegno) e vengono comandate sul posto.

Sistemazione dei vacuometri.

Nel disegno sono indicati tutti i punti in cui sono montati dei vacuometri. Come si vede non tutti i vacuometri hanno un alimentatore fisso, ma solo 5.

Precisamente il n.1 serve per conoscere la pressione all'ingresso del raccordo Linac-ciambella; i n.2 e 3 leggono la pressione nell'interno dei deflettori (le cavità più difficili da vuotare); i n.4 e 5 leggono la pressione nelle sezioni in cui si incrociano i fasci, cioè dove verranno fatte le esperienze.

Tutti questi vacuometri hanno degli strumenti di lettura anche in sala comando, controllati dai singoli alimentatori in loco. E' previsto inoltre un sistema di relais per il cambio di scala automatico sia sugli alimentatori che sugli strumenti della sala comando.

Se la pressione dovesse salire, durante il funzionamento della macchina, oltre i limiti consentiti, i vacuometri accendono una spia luminosa (o anche acustica) in modo che l'operatore possa subito prendere i necessari provvedimenti (arresto del Linac in fase di accumulazione, ecc.). Infine il vacuometro 1 chiude automaticamente il rubinetto A quando la pressione supera un certo limite prefissato. Il rubinetto A può essere chiuso anche a mano, o dalla cabina comando.

Riscaldamento del sistema di vuoto.

L'alimentatore elettrico delle resistenze sarà situato fuori della sala comando.

Gli strumenti di misura della temperatura non saranno centralizzati ma posti ciascuno vicino alla propria termocoppia.

5) Controllo dei fasci

Il problema della rivelazione dei fasci in Adone si presenta assai diverso e abbastanza più complicato di quanto non lo sia in una macchina di tipo convenzionale. Infatti, trattandosi di un anello di accumulazione, è necessario servirsi di sistemi non distruttivi e per quanto più possibile non perturbativi dei fasci circolanti, tenendo presente che tali sistemi vanno posti in una camera da vuoto in cui la pressione è inferiore a 10^{-9} torr.

Per quanto riguarda le informazioni assolute delle cor-

renti di elettroni e positroni si ricorre a sistemi ad induzione elettrostatica e magnetica. A seconda della loro posizione nella macchina, l'informazione di ciascuno di questi due sistemi è proporzionale ad una funzione della somma e della differenza delle intensità dei due fasci. Per ottenere una misura indipendente di ciascuna delle due intensità occorre quindi servirsi dei due sistemi. Sarà sufficiente eseguire misure assolute di questo tipo in un solo punto della ciambella ed abbiamo scelto all'uopo una delle due sezioni dritte completamente libere (da deflettori, cavità ed esperienze) la quale sarà dotata di un'apposita scatola contenente appunto un elettrodo ad induzione elettrostatica ed un toro ad induzione magnetica.

Negli altri ottanti della macchina basta avere un'informazione posizionale dei fasci per la determinazione dell'orbita chiusa. (In prima approssimazione questa è la medesima sia per elettroni che per positroni). Un metodo già sperimentato su ADA è quello di analizzare la radiazione elettromagnetica emessa dalle particelle in moto. Sappiamo che tale emissione avviene in un piccolo cono centrato intorno alla direzione della velocità delle particelle ed è quindi facilmente osservabile in direzione tangenziale al fascio nei tratti curvi. Attraverso una finestrella di quarzo sulla ciambella si può analizzare la radiazione che, nel caso di ADONE ha un range di lunghezze d'onda che si estende dall'ultravioletto a qualche decina di Å al crescere dell'energia finale dei fasci.

Con questo metodo, le misure assolute di intensità non sono molto accurate; si ha per contro una notevole precisione sulla posizione dei fasci nella ciambella. Se questo metodo non si dimostrasse utilizzabile essenzialmente per ragione di geometria e locazione delle apparecchiature, si può ricorrere a particolari sistemi a pickup magnetico, già sperimentati nell'elettrosincrotrone di Cambridge, i quali però hanno una sensibilità assai inferiore di quella del metodo precedentemente esposto della radiazione.

Questi sistemi non sono altro che coppie di bobine tipo Helmholtz piazzate con l'asse normale ai fasci.

L'informazione che se ne ricava è proporzionale alla intensità e alla posizione dei fasci in una sezione normale della ciambella.

Si potrebbe posizionare un pick-up per sezione dritta della macchina.

Per finire vogliamo accennare ad un altro tipo di feno-

meno che potrebbe richiedere una serie di apparecchiature disseminate lungo la ciambella complicando assai la camera da vuoto. Si tratta della formazione di ioni per causa dello scattering sul gas residuo delle particelle costituenti i fasci. Gli ioni positivi sono particolarmente dannosi perché vengono intrappolati nella regione dove transita il beam di elettroni provocandone una forte diminuzione di intensità.

In realtà nel nostro caso si può ovviare a questo inconveniente per es. iniettando prima i positroni e poi gli elettroni fino a raggiungere al massimo la medesima intensità. Se però non si prende questa precauzione è necessario piazzare lungo la ciambella tutta una serie di campi elettrici (realizzati con piastre) diretti normalmente al cammino delle particelle e alternativamente di senso opposto per non perturbarne le orbite.

9) LA RADIOFREQUENZA

Prestazioni richieste e tipo di soluzione

La frequenza fondamentale della macchina è pari a circa 5,1 megacicli/sec. Si assume di lavorare con la seconda armonica della frequenza fondamentale e quindi la pulsazione caratteristica degli impianti è stata fissata pari a $\omega = 0.64 \cdot 10^8$ rad/sec ($F \approx 10,2$ MHz).

L'energia che in condizioni di regime deve essere fornita ad ogni particella è di 11,2 KeV per giro ed è stato quindi deciso di adottare per la tensione acceleratrice il valore di 20 KV.

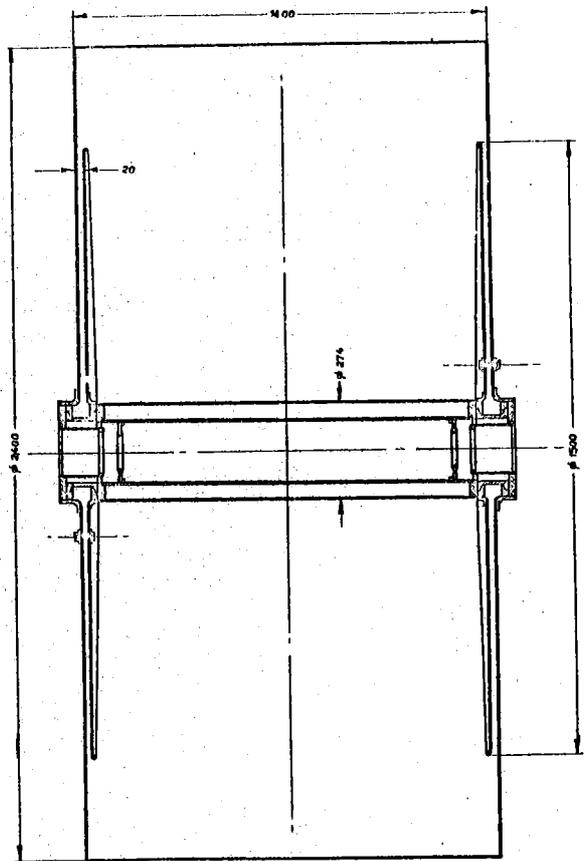
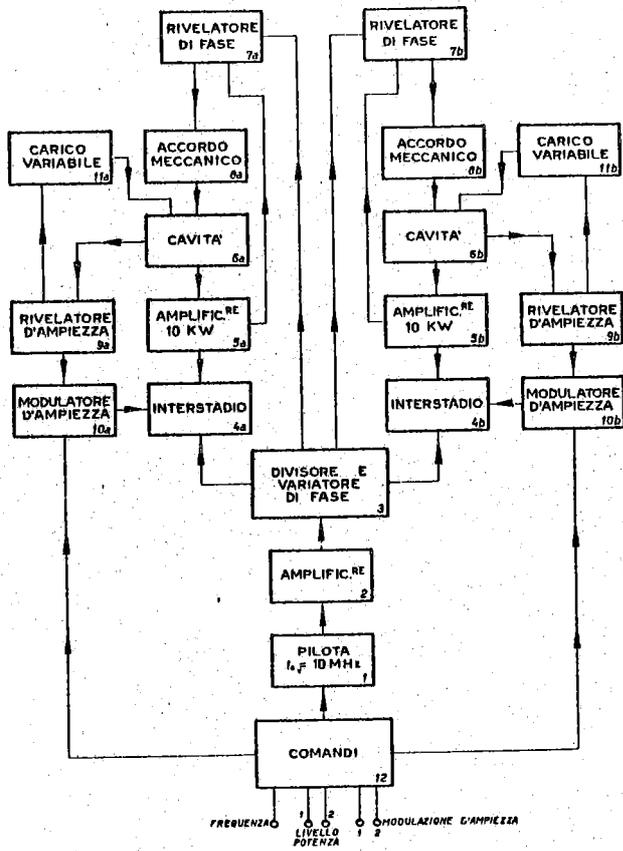
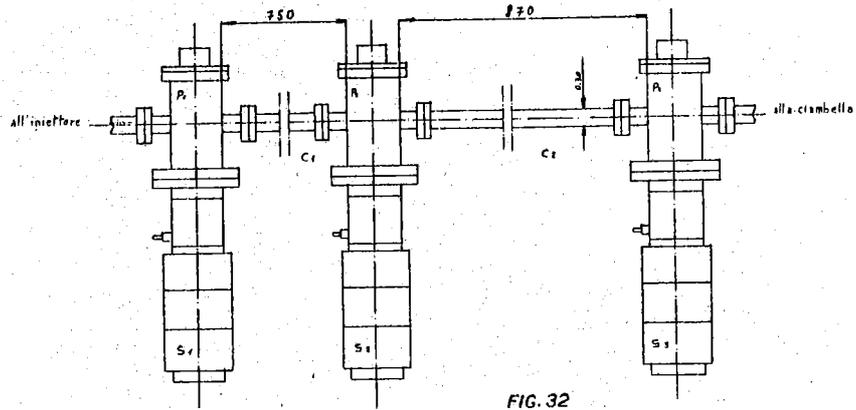
Assumendo intorno a 500 mA la corrente media del fascio la potenza media che l'impianto deve erogare risulta di 5,5 KW. Le prestazioni anzidette vengono integrate dal requisito fondamentale dell'impianto radio di un anello di accumulazione che è quello dell'assoluta costanza dell'ampiezza e frequenza della tensione che viene applicata al fascio circolante.

Questo requisito si traduce nella esigenza di un notevole sovradimensionamento di tutto l'impianto e della suddivisione delle unità acceleratrici nel maggior numero possibile.

Il sovradimensionamento è richiesto dal fatto che l'impianto deve poter funzionare dando le prestazioni volute per lunghi periodi di tempo durante i quali non devono assolutamente manifestarsi fenomeni connessi a derive termiche o ad invecchiamento.

La suddivisione invece delle unità acceleratrici e degli impianti associati riduce la probabilità di momentanee mancanze della tensione acceleratrice che possono essere originate da scariche all'interno dei risuonatori o da eventuali alterazioni del funzionamento degli impianti (arceggiamento nelle valvole etc.).

A sua volta però, la possibilità di un anche momentaneo fuori esercizio di un impianto richiede la completa sovraccaricabilità dell'altro (o degli altri se sono più di due) e di questo si deve tener conto nel dimensionamento degli impianti stessi. Come compromesso è stato deciso di adattare due sole unità acceleratrici ciascuna delle quali possa far funzionare da sola tutta la macchina. Il fatto di usare due impianti distinti che funzionano insieme sullo stesso fascio impone il problema della loro sincronizzazione in frequenza ed in fase.



A ciò si provvede, per quanto riguarda la frequenza con l'alimentazione attraverso un unico pilota e per quanto riguarda le fasi iniziali con l'aggiustamento di una linea a ritardo variabile come sarà detto successivamente.

Durante il funzionamento le eventuali variazioni del carico, le variazioni termiche e le piccole vibrazioni meccaniche possono alterare il sincronismo di fase dei risuonatori ora detto. Però il circuito di accordo automatico che deve essere previsto e che verrà descritto successivamente, mantenendo accordate le cavità rende sempre automaticamente verificata la condizione voluta sulle fasi. Difatti se i risuonatori sono accordati allora gli amplificatori terminali erogano tensioni che sono in opposizione esatta a quelle di eccitazione e queste a loro volta stanno nelle relazioni di fase imposte dai parametri che regolano il funzionamento degli impianti cioè nelle relazioni volute.

L'impianto proposto

In fig. 33 è riportato lo schema a blocchi di tutto lo impianto che, secondo quanto detto precedentemente, è costituito da un unico pilota che eccita due distinte catene di amplificazione (contraddistinte con le lettere a e b) ciascuna delle quali alimenta il proprio risuonatore. Il segnale a radiofrequenza viene prodotto, con frequenza uguale a quella finale ed al livello di qualche watt, nei circuiti del pilota indicati con il blocco 1. E' previsto che sia possibile variare con continuità la frequenza di lavoro entro il campo 11-13 MHz con stabilità su ciascuno dei valori intermedi migliore di 10^{-5} per brevi periodi (tempi dell'ordine dell'ora) e di 10^{-4} per periodi lunghi (tempi dell'ordine delle 50 ore).

Dal pilota, attraverso un amplificatore a larga banda (10%) (blocco 2) il segnale raggiunge il circuito divisore e variatore di fase (blocco 3). Qui il segnale viene sdoppiato in due segnali della stessa ampiezza e frequenza che possono avere uno spostamento tra di loro regolabile con continuità tra -180 e $+180^\circ$.

I due segnali in uscita, contraddistinti con le lettere "a" e "b", vanno a pilotare le rispettive catene di amplificazione che sono contraddistinte con gli stessi numeri e sono identiche tra di loro (quindi ciò che viene detto per i blocchi "a" vale anche per i blocchi "b").

Il blocco 4, interstadio contiene tutti gli amplificatori che servono ad elevare il livello del segnale fino ad

1 KW; gli amplificatori sono in classe AB e l'ultimo amplificatore contenuto nell'interstadio può essere modulato in ampiezza variando il livello della polarizzazione di griglia. Si tratta di modulazioni negative che possono solo ridurre l'ampiezza del segnale in uscita. La potenza erogata deve poter passare sotto modulazione da 1 KW fino a circa zero. La valvola dello stadio da 1 KW può essere per esempio il tetrodo Philips QBL 5/3500 che può erogare fino a 3 KW ma che viene usata qui per le ragioni di sovradimensionamento anzidette e che si presta molto bene per modulazioni combinate di griglia e griglia schermo.

Il segnale proveniente dal blocco 4 pilota, anche attraverso 200 m di cavo coassiale, lo stadio terminale, blocco 6, nel quale è prevista una valvola capace di dare ~ 10 KW e che può essere per esempio il triodo Siemens RS 1001. Questo può dissipare fino a 10 KW in placca, richiede per erogare 11 KW di potenza attiva circa 600 watt di pilotaggio quando venga montato "grounded grid" e sembra quindi largamente sovradimensionato per gli scopi richiesti.

Il blocco 6 indica il risuonatore che accelera il fascio.

I blocchi 7 ed 8 indicano il circuito di accordo automatico. Precisamente nel blocco 7 è indicato il circuito di un rivelatore di fase che confronta la fase tra la tensione che pilota tutta la catena di amplificazione e quella prodotta sulla spira di accoppiamento dell'amplificatore terminale. L'uscita del discriminatore di fase comanda, attraverso un asservimento elettromeccanico, la posizione di un elettrodo di controllo che accorda il risuonatore compensandone le derivate (le derivate dell'accordo possono nascere da ragioni termiche e di carico oltre che da piccole vibrazioni meccaniche).

I blocchi 9, 10 e 11 costituiscono il sistema di controllo di ampiezza che è formato da due distinti circuiti. Precisamente, il rivelatore di ampiezza legge la tensione che si manifesta al gap del risuonatore (blocco 9) e comanda i circuiti indicati nei blocchi 10 e 11. Nel blocco 10 sono indicati i circuiti del modulatore di ampiezza che può far variare (dinamicamente) di un 10% l'ampiezza del segnale in cavità mentre nel blocco 11 è indicato un carico variabile connesso con la cavità.

In questo modo le variazioni di carico dovute a variazioni nel fascio (di qualunque origine, per esempio conseguenti ad una scarica in uno dei due risuonatori) hanno l'effetto di far variare l'energia assorbita dal carico variabile ren-

dendo quindi all'incirca costante l'impedenza che il risuonatore offre all'amplificatore terminale.

Come vedremo, studiando i dettagli dell'impianto, tale carico deve poter assorbire una potenza massima dell'ordine di grandezza dei 5 KW e può quindi essere realizzato con una valvola che abbia questa dissipazione anodica, come esempio la valvola RS 10712 prodotta dalla Siemens è adatta allo scopo. Notiamo qui, e sarà precisato nel seguito che il carico variabile ora proposto non richiede gli alimentatori di potenza ma solo il circuito polarizzatore e quello di accensione dei filamenti rendendo minima la complicazione di impianto e la possibilità di disservizi.

Con il blocco 12 sono indicati i controlli e comandi; di qui è anche possibile effettuare una modulazione di ampiezza (simmetrica di $\pm 10\%$).

Caratteristiche di carico

Quando entrambi i risuonatori contribuiscono in egual misura ad accelerare il fascio (condizioni di funzionamento normale) ciascun risuonatore deve cedere $W_n = W_t/2 = 5,5/2 = 2,75$ KW.

La fase sincrona φ'_s è definita da:

$$(1) \quad \left. \begin{aligned} \operatorname{sen} \varphi'_s &= \frac{11,2 \times 10^3}{2 \times 20 \times 10^3} = 0,28 \\ \sqrt{1 - (0,28)^2} &= 0,96 \end{aligned} \right\}$$

Con riferimento al rapporto LNF-62/23⁽¹²⁾ e con i dati assunti per l'energia irradiata il componente di fondamentale della corrente del fascio vale:

$$I_F = \frac{2W_e}{-v \cos(\varphi_s + \frac{\pi}{2})} = \frac{5,5 \times 10^3}{0,28 \times 2 \times 10^4} \approx 1 \text{ amp}$$

e quindi la resistenza e la capacità equivalenti con le quali il risuonatore risulta caricato dal fascio sono:

$$(2) \quad \left. \begin{aligned} R'_{eq} &= -\frac{v}{I_F \cos(\frac{\pi}{2} + \varphi'_s)} = 71,428 \Omega \\ C'_{eq} &= \frac{I_F \operatorname{sen} \varphi'_s}{\omega v} = 0,66 \text{ picofarad} \end{aligned} \right\}$$

Nelle condizioni di sovraccarico, restando costante la corrente del fascio, un solo risuonatore deve poter fornire tutta la potenza necessaria e quindi i parametri equivalenti del fascio diventano:

$$(3) \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{sen } \varphi_s'' = \frac{11.2 \times 10^3}{2 \times 10^4} = 0.56 \\ \sqrt{1 - (0.56)^2} = 0.828 \\ R_{e2}'' = 35.714 \Omega \\ C_{e2}'' = 0.56 \text{ pF} \end{array} \right.$$

I valori dati dalle (3) sono quelli da prendere in considerazione per il calcolo di progetto.

I risuonatori destinati ad accelerare il fascio sono stati scelti di tipo rientrante.

In fig. 34 sono riportate quelle dimensioni meccaniche che influiscono direttamente il comportamento elettrico del risuonatore.

I parametri elettrici compatibili con la struttura proposta sono:

$$(4) \quad \left\{ \begin{array}{l} \omega_s = 0.64 \times 10^8 \text{ rad/sec} \\ Q_s \geq 3000 \\ R_s \geq 10^5 \Omega \end{array} \right.$$

Quindi per poter mantenere la tensione di 20.000 Volt ciascun risuonatore richiede una potenza di 2 KW.

In condizioni di funzionamento normali ciascun impianto deve quindi fornire $2 + 2,5 = 4,5$ KW essendo 2,5 KW la potenza ceduta al fascio.

In condizioni di sovraccarico tale potenza può al più raddoppiare e ciascun impianto deve poter erogare

$$W_s = 2 + 5 = 7 \text{ KW}$$

avendo indicato con W_s la potenza massima in regime di sovraccarico.

Ne consegue che il carico variabile dovrà poter assorbire al max una potenza pari a tutta quella che il fascio può richiedere: 5 KW, e che in condizioni di funzionamento norma-

le deve assorbire una potenza W_c pari a 2,5 KW.

Sembra quindi che gli amplificatori terminali, progettati per 10 KW abbiano un sufficiente margine di potenza atto a garantire i requisiti di stabilità e sicurezza di funzionamento richiesti.

Parametri relativi all'accoppiamento con la cavità risonante

I risuonatori destinati ad accelerare il fascio vengono eccitati con una spira di accoppiamento secondo lo schema dato in fig.35 cui corrisponde lo schema elettrico dato in fig.36.

Supponendo che gli amplificatori debbano lavorare alla massima potenza e cioè fornire 10 KW riassumiamo qui i dati principali relativi al circuito "Finale cavità".

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega_0 = 0.64 \cdot 10^8 \text{ rad/sec} \\ Q_0 = 465 \text{ (fattore di merito a carico)} \\ R_0 = 20000 \text{ ohm (resistenza equivalente totale)} \end{array} \right.$$

Risuonatore

$$\left\{ \begin{array}{l} L_2 = \frac{R_0}{\omega_0 Q_0} = 6,72 \cdot 10^{-7} \text{ H} \\ C = \frac{Q_0}{\omega_0 R_0} = 360,180 \text{ PF.} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Circuito equivalente } L_1 = 0,8778 \cdot 4,94074 = 5,83 \cdot 10^{-7} \text{ H} \\ M = K \sqrt{L_1 L_2} = 3,07 \cdot 10^{-8} \text{ H} \\ \xi = 60 \text{ ohm} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Tensioni } V_a = 2190 \text{ Volt} \\ V_s = 1095 \text{ Volt} \\ V = 20000 \text{ Volt} \end{array} \right.$$

Le formule di progetto per calcolare i dati ora esposti sono state dimostrate altrove (13).

Sempre con riferimento a questa trattazione è stato calcolato l'andamento del rapporto tra la tensione di ingresso

so V_a e la tensione massima sul risuonatore V in funzione della capacità totale del risuonatore ed assumendo come parametro il valore del carico totale R .

Poiché sia le variazioni del carico reattivo dovuto a variazioni nel fascio circolante sia le variazioni delle dimensioni meccaniche del risuonatore possono essere ricondotte a variazioni della capacità totale del risuonatore stesso i diagrammi riportati in fig. 37 danno una indicazione della maggiore o minore criticità degli impianti in funzione delle variazioni di carico.

Come si può vedere la curva relativa al valore 20.000 è molto piatta e variazioni di capacità di $\pm 0,5$ pfarad fanno variare il rapporto anzidetto meno del 5%. Si può quindi concludere che in queste condizioni le variazioni di capacità introdotte dal fascio non perturbano il funzionamento del risuonatore e che il circuito di correzione per le variazioni dinamiche di ampiezza può compensare queste variazioni per quanto ciò possa essere ritenuto anche superfluo.

Appare anche dai diagrammi citati che se non si adotta il carico variabile si viene a spendere quasi la stessa potenza e si complica l'impianto con l'impiego dei tubi di reattanza necessari per rifasare il carico. Difatti in questo caso si dovrebbe lavorare sulla curva che si riferisce a 50000 ohm di carico e per la quale la variazione di $\pm 0,5$ pF dà luogo ad una variazione del rapporto $\frac{V}{V_a}$ pari a circa il 15%.

L'impianto dei tubi di reattanza dovrebbe poter mettere in gioco la potenza reattiva di

$$W_R = \frac{1}{2} \cdot 10^4 \cdot 4 \cdot 10^{-4} = 2 \cdot 10^0 \text{ KVAR}$$

che assumendo anche un rendimento dell'80% impone una dissipazione di potenza attiva di circa 2 KW.

Si risparmierebbe un po' di potenza attiva rispetto a quanto proposto ma si dovrebbero affrontare notevoli complicazioni e probabili instabilità di tutto l'impianto senza contare che l'amplificatore terminale verrebbe a lavorare in condizioni di carico reale fortemente variabile e si renderebbe problematico l'uso di un cavo coassiale per connettere l'amplificatore terminale al risuonatore stesso.

Dimensionamento del carico variabile

Con riferimento allo schema dato in fig. 38 il componen

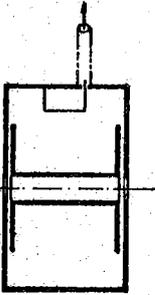


FIG. 35

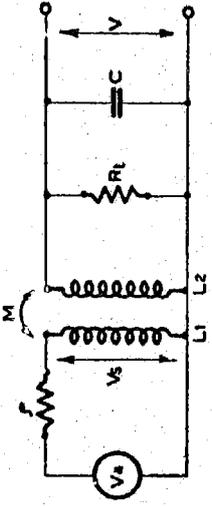


FIG. 36

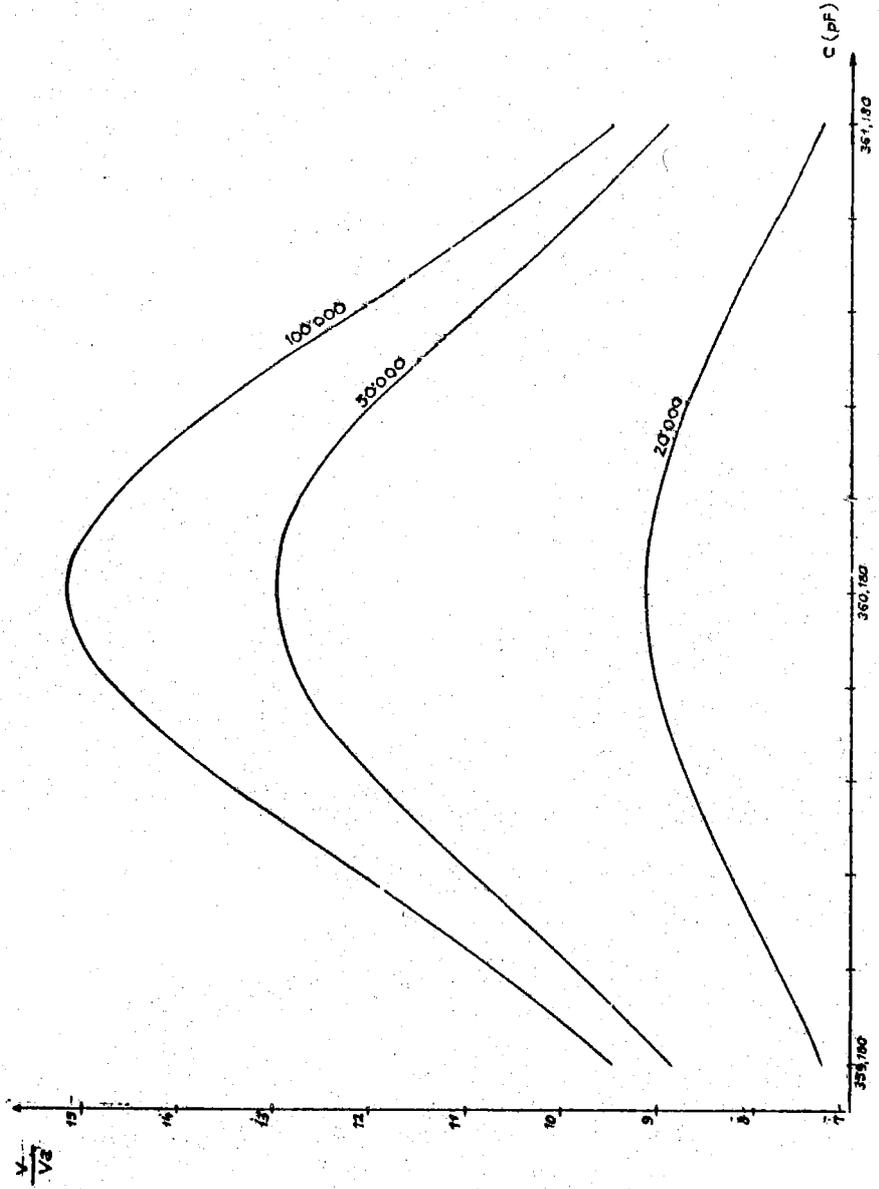


FIG. 37

te alternata della corrente che può passare nel circuito di placca della valvola se la tensione alternata di placca è V_p è:

$$10) \quad I_p = \frac{1}{S} (V_p + \mu V_g)$$

Se quindi mediante un partitore compensato si impone che il rapporto vettoriale tra tensione di placca e tensione di griglia sia uguale a K (numero reale) allora l'impedenza dinamica che la placca presenta vale:

$$10) \text{ bis} \quad Z_p = R_p = \frac{S}{1 + \frac{\mu}{K}}$$

Quindi una valvola connessa al risuonatore come indicato nello schema dato in fig.37 introduce ai capi della spira di accoppiamento un carico valutabile approssimativamente con la formula 10 bis.

Per la valvola citata come esempio si hanno i seguenti parametri caratteristici

$$\begin{cases} V_p = 4 \text{ kV} & I_p = 1 \text{ Amp} \\ \mu = 60 & G_m = 38 \text{ mA/V} \end{cases}$$

poichè la tensione ottima di segnale è intorno a 200 V si assume $K = 20$ e quindi $Z_p = \frac{1.600}{1 + \frac{60}{20}} \approx 400$ ohm nelle condizioni di massima dissipazione.

Questi 400 ohm sono calcolati con la valvola in caratteristica e poichè nelle condizioni indicate dal circuito di fig.38 la valvola lavora solo per mezzo periodo il carico introdotto si riduce a circa 800-1000 ohm.

Per dissipare circa 5 KW su 1000 ohm occorre una tensione pari a

$$V = \sqrt{2WR} \approx 3300 \text{ Volt}$$

Quindi il tubo in questione deve essere collegato al risuonatore con una spira di accoppiamento ai cui capi si sviluppano all'incirca 3500 V e questo corrisponde ad una spira che abbracci all'incirca il 25% del flusso totale.

Variando la polarizzazione di griglia della valvola si

variano contemporaneamente i valori di μ e di G_m con conseguente variazione del valore di Z e quindi della regolazione introdotta.

Conclusioni

L'impianto proposto sembra sufficiente per soddisfare alle prestazioni richieste e per fornire una potenza utile di circa 5 KW impegna una potenza utile di 20 KW e richiede dalla rete elettrica una potenza attiva valutabile complessivamente in 30-40 KW.

Certamente la soluzione proposta non è la sola possibile, altre sono allo studio ma comunque se non cambia il numero delle unità acceleratrici e cioè la filosofia dell'impianto le potenze ora indicate non cambiano d'ordine di grandezza al cambiare delle soluzioni.

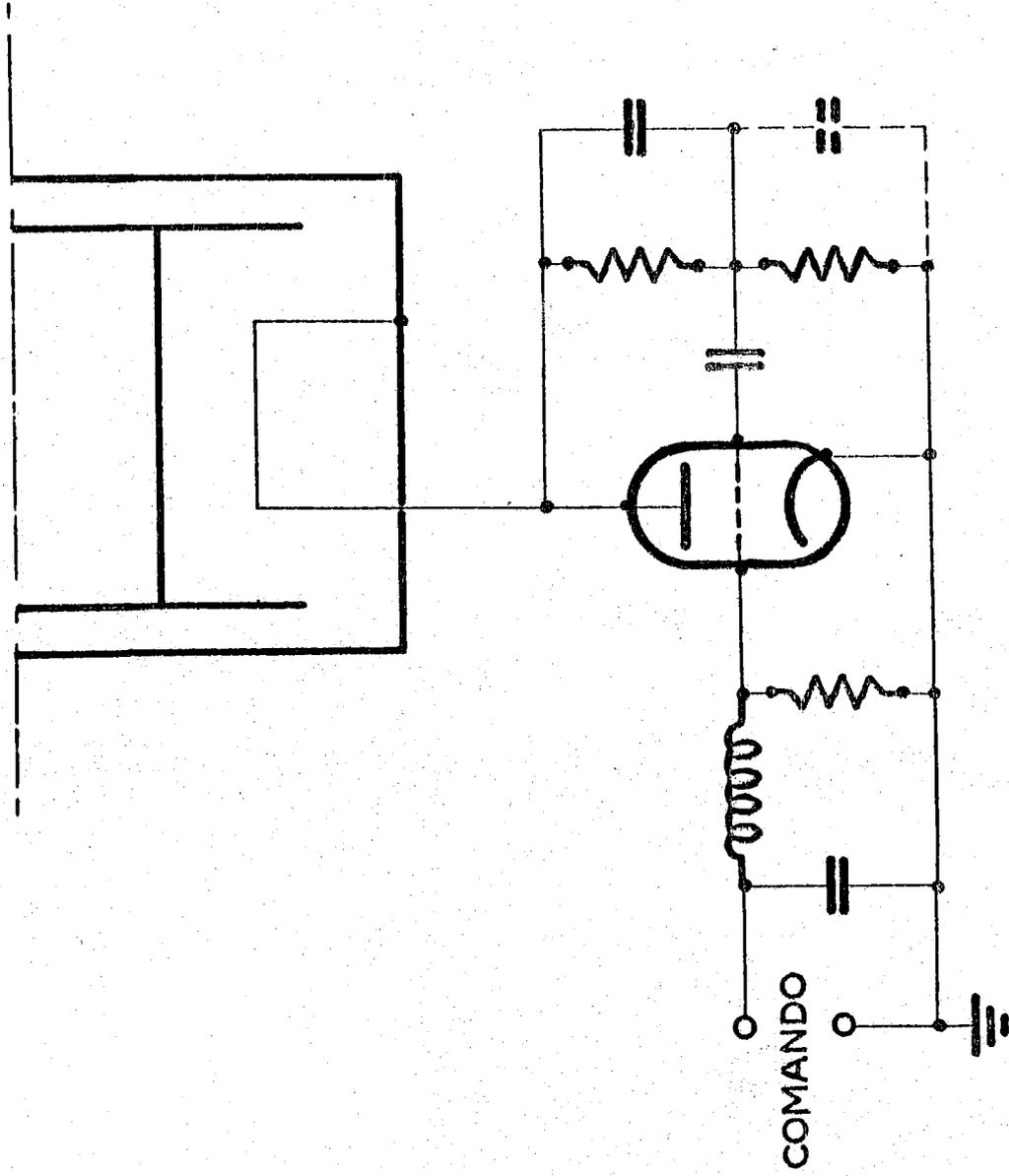


FIG. 38

10) LA LUMINOSITA' ALL'INCROCIO DEI FASCI

La frequenza di interazione \dot{n} in una zona di incrocio per un evento di sezione d'urto σ (in cm^2) è data da:

$$1) \quad \dot{n} = \sigma / k \int \rho_+ \rho_- dS \quad (\text{eventi/sec})$$

dove: f è la frequenza di rotazione in sec^{-1} ;

K l'ordine dell'armonica della RF;

ρ_+ , ρ_- le densità trasverse per pacchetto di positroni ed elettroni, in part/cm^2 .

L'integrale di superficie è esteso a tutto un piano normale alla direzione delle traiettorie nel punto di incrocio.

Se le densità trasverse sono sufficientemente basse (ρ_+ e $\rho_- \ll 10^{12} \text{ part/cm}^2$) l'interazione coulombiana tra i due fasci è trascurabile, e nella zona di incrocio essi seguono praticamente la stessa traiettoria con velocità opposte, mantenendo la distribuzione delle densità trasverse uguale a quella di un fascio circolante da solo.

In questo caso, nota la distribuzione naturale di un fascio, è facile il calcolo dell'integrale nella 1); assumiamo che la distribuzione naturale sia gaussiana nelle due direzioni radiale (x) e verticale (z):

$$2) \quad \rho(x, z) = 2 \frac{N}{k \pi w h} \exp \left[-2 \left\{ \frac{x^2}{w^2} + \frac{z^2}{h^2} \right\} \right]$$

dove: N/k è il numero di particelle per pacchetto;

w e h sono il doppio delle larghezze quadratiche medie della distribuzione della densità, rispettivamente lungo x e z .

La luminosità L , definita come il coefficiente che moltiplicato per la sezione d'urto dà la frequenza di interazione, sarà data:

$$3) \quad L = f k \int \rho_+ \rho_- dS = f \frac{N_+ N_-}{k \pi w h} \quad (\text{cm}^{-2} \text{sec}^{-1})$$

Quando la densità trasversa di uno o di ambedue i fasci raggiunge o supera il valore di $\sim 10^{12} \text{ part/cm}^2$, l'interazione coulombiana tra i due fasci fa sì che la loro distribuzione trasversa venga alterata rispetto a quella naturale, o,

addirittura, che i baricentri delle due distribuzioni non seguano più la stessa traiettoria.

In questo caso la luminosità viene a dipendere in maniera assai complessa dalla densità dei fasci circolanti e dalla struttura magnetica dell'anello.

Per avere le necessarie informazioni sul fenomeno, si è ricorsi ad un calcolo numerico (4); rimandando alla (4) per la discussione dettagliata del metodo e delle approssimazioni, ne riassumiamo qui i risultati.

Il calcolo è stato eseguito solo per intensità uguali di elettroni e positroni; le variabili sono due: l'intensità dei due fasci e l'angolo delle oscillazioni verticali di betatrone tra due successive zone di incrocio; il risultato del calcolo è un dato proporzionale alla luminosità.

Mediante opportuni fattori di scala i risultati sono applicabili a qualunque tipo di struttura.

I fattori di scala che permettono di passare dalle grandezze usate nel calcolo numerico alla corrente circolante I ed alla luminosità L di una particolare macchina sono i seguenti:

$$4) \quad I = \frac{ek}{2\sqrt{2\pi} r_e} \omega \gamma \left(\frac{\beta^*}{\beta_v} \right) \left(\frac{h}{h^*} \right) n^* \overline{DE}^*$$

$$5) \quad L = \frac{ek}{(2\pi r_e)^2} \sqrt{\frac{H}{4}} \omega \gamma^2 \left(\frac{\beta^*}{\beta_v} \right)^2 \left(\frac{h}{h^*} \right) \overline{DE}^2 \overline{UM}$$

dove: $e_e = 1.6 \times 10^{-19}$ Coul è la carica dell'elettrone;

$r_e = 2.82 \times 10^{-13}$ cm il raggio classico dell'elettrone;

β_v = grandezza caratteristica delle oscillazioni di betatrone (14) relativa alle oscillazioni verticali nel punto di incrocio;

γ = energia delle particelle in unità di mc^2 ;

$n^* = 10^3$, $h^* = 5.4 \times 10^{-3}$, $\beta^* = 1$ fattori numerici nel programma;

\overline{DE} = grandezza proporzionale alla densità trasversa di carica di un fascio;

\overline{UM} = grandezza proporzionale alla luminosità.

Nella 4) e nella 5) le quantità asteriscate sono quelle che entrano nel calcolo numerico.

La 4) e la 5) differiscono lievemente nei coefficienti rispetto alle analoghe formule riportate a pag. 6 del lavoro citato (4); ciò è dovuto al fatto che, mentre in esso si è fatta l'ipotesi di distribuzione uniforme della densità nel piano radiale, qui si è tenuto conto della distribuzione gaussiana.

In fig. 39 sono riportati i risultati, e cioè i valori di $\overline{UM}/\overline{UM}_0$ in funzione di \overline{DE} e del parametro μ_v (angolo di betatrone tra due incroci successivi); quest'ultimo è definito almeno di un numero intero di π .

\overline{UM}_0 è il valore che dovrebbe assumere \overline{UM} qualora le due distribuzioni di densità rimanessero uguali a quella naturale e con i baricentri sulla stessa traiettoria. Si ha quindi $\overline{UM}/\overline{UM}_0 = 1$ quando gli effetti di carica spaziale sono trascurabili.

I dati di fig. 39, per mezzo dei fattori di scala 4) e 5), permettono di calcolare la luminosità in funzione della corrente circolante (quest'ultima supposta eguale per i due fasci) per qualunque tipo di struttura.

Dalla fig. 39 si può vedere che, per aumentare il valore di corrente a cui iniziano gli effetti di carica spaziale, conviene che il valore di μ sia molto prossimo a zero; per $\mu_v = 5^\circ$ si ha $\overline{UM}/\overline{UM}_0 = 1$ per $\overline{DE} \approx 5.5 \times 10^{-5}$, mentre per $\mu_v = 160^\circ$ si ha $\overline{UM}/\overline{UM}_0 = 1$ per $\overline{DE} \approx 2 \times 10^{-7}$; il rapporto tra le correnti nei due casi al limite di carica spaziale è quindi di circa 270, e quello tra le luminosità è circa 7×10^4 .

Questa notevole differenza nelle luminosità ottenibili al diminuire di μ_v è l'elemento che ci ha fatto preferire la struttura a funzioni separate; con la quale è possibile variare il valore di μ durante il funzionamento. Un fascio solo è instabile in una macchina con $\mu_v \rightarrow 0$; pensiamo quindi di accumulare i fasci con un valore di μ_v abbastanza diverso da zero, e di cambiarlo poi, cercando il valore che rende massima la luminosità, osservando la frequenza di interazione di un processo di annichilamento, quale, ad esempio, quello in 2γ .

La 5), insieme ai risultati di fig. 39, mostra che, per una data macchina con un certo valore di μ , la luminosità e la corrente sono proporzionali alle dimensioni trasverse naturali del fascio w e h .

Si possono pensare vari modi per aumentare h ; il più conveniente sembra essere quello di avere i due fasci incrociati con un angolo 2α nel piano verticale. In questo caso il valore dell'altezza h da introdurre nelle 4) e 5) è dato dalla

proiezione del fascio su un piano normale al piano mediano, cioè da $l\alpha$, se l è la lunghezza del pacchetto⁽¹⁵⁾; la differenziazione delle orbite dei positroni e degli elettroni, in modo che i fasci si incontrino con un angolo 2α , come indicato in fig. 40, è ottenuta con campi elettrici opportunamente disposti lungo l'anello.

Un altro modo per aumentare il valore di h , con incrocio ad angolo 0, è l'accoppiamento tra le oscillazioni radiali e quelle verticali; poiché le dimensioni naturali radiali, dovute alle oscillazioni di betatrone, sono assai maggiori (circa un fattore 10^2-10^3) di quelle verticali, queste ultime possono essere aumentate trasferendo parte dell'energia di oscillazione dal piano radiale a quello verticale.

A questo proposito vi è da notare che un sia pur piccolo accoppiamento vi sarà certamente, dovuto agli inevitabili errori di allineamento, soprattutto dei quadrupoli; prevediamo che il fattore di accoppiamento dovuto agli errori sia circa 10^{-2} .

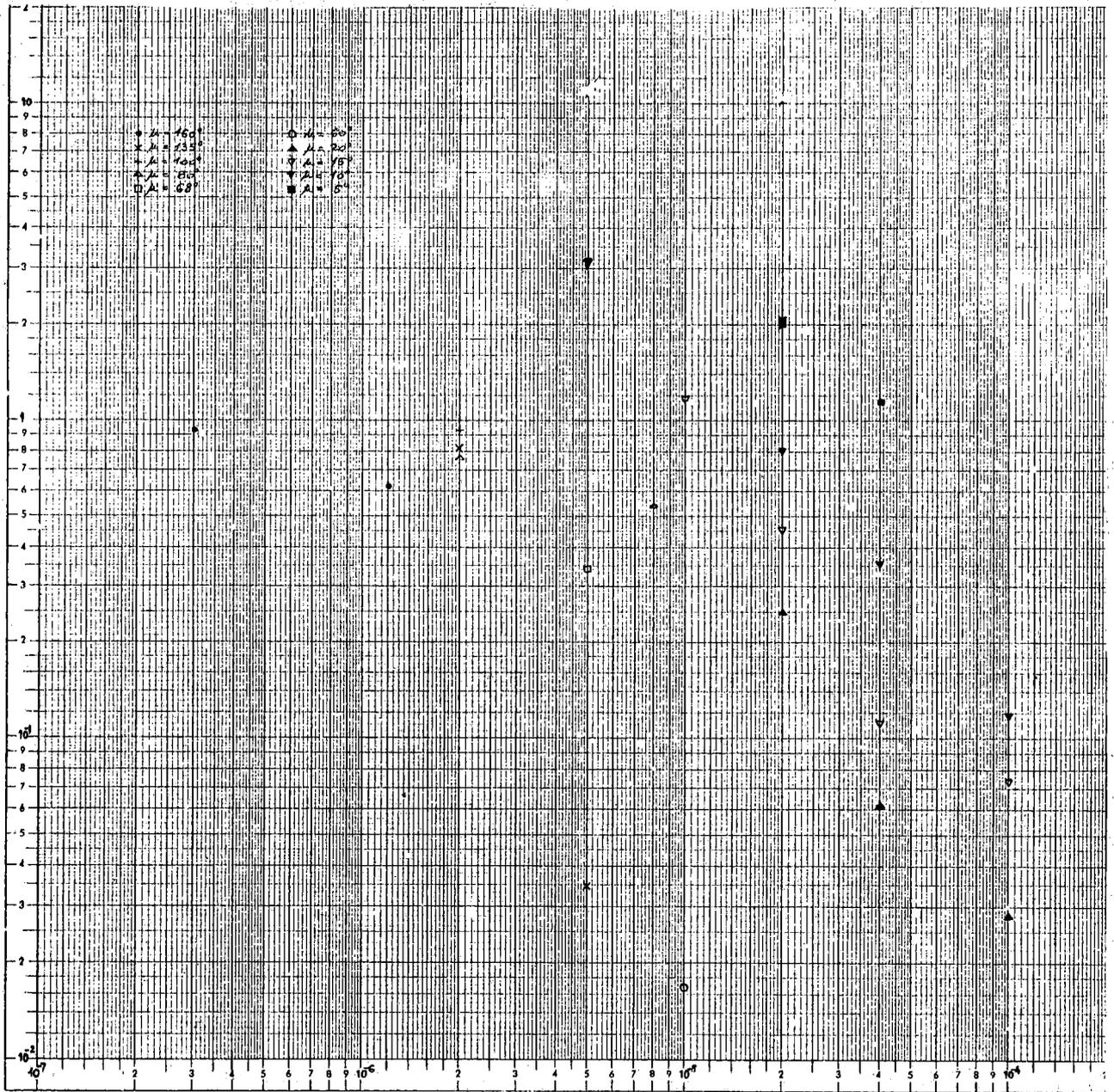
Dei due metodi per aumentare la dimensione efficace del fascio, l'incrocio ad angolo presenta però, rispetto all'accoppiamento, un grande vantaggio: la dimensione longitudinale della zona di incrocio viene assai ridotta, migliorando così notevolmente le condizioni per la sperimentazione. Di ciò tratteremo più avanti in maggior dettaglio.

Vediamo ora come ci si può servire di questi risultati per il calcolo della luminosità e della corrente circolante in una data macchina.

Definite le caratteristiche dell'anello, e quindi le grandezze f , K , β_v , γ , ω e h che entrano nelle 4) e 5) e l'angolo di betatrone μ_v tra due incroci successivi, i dati di fig. 39 relativi al valore di μ_v scelto permettono di tracciare una curva della luminosità in funzione della corrente circolante.

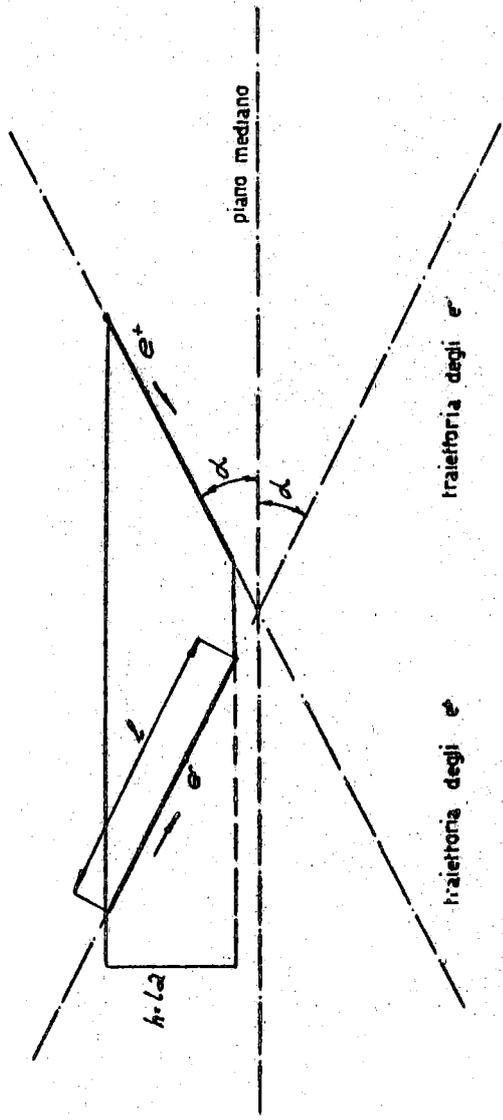
Se per h si è presa l'altezza naturale del fascio (nel quale consideriamo anche gli eventuali effetti di accoppiamento dovuti agli errori di allineamento), se cioè si considera l'incrocio ad angolo zero con dimensioni verticali minime, definiamo corrente limite (I_{lim}) e luminosità limite (L_{lim}) quei valori di I e L al di là dei quali l'andamento di L si scosta dalla legge quadratica in I ; riportandosi alla fig. 39, la I_{lim} e la L_{lim} corrispondono a quel valore di DE per cui UM/UM_0 diviene minore di 1.

Per aumentare il valore della luminosità al di là di L_{lim} si può aumentare h ; mantenendo costante il valore di DE au



© COPYRIGHT GARG./FORSCHEBERG/LEWIS/TECHNICAL JOURNAL, Nr. 366/1, 2

FIG. 39



incrocio ad angolo

FIG. 40

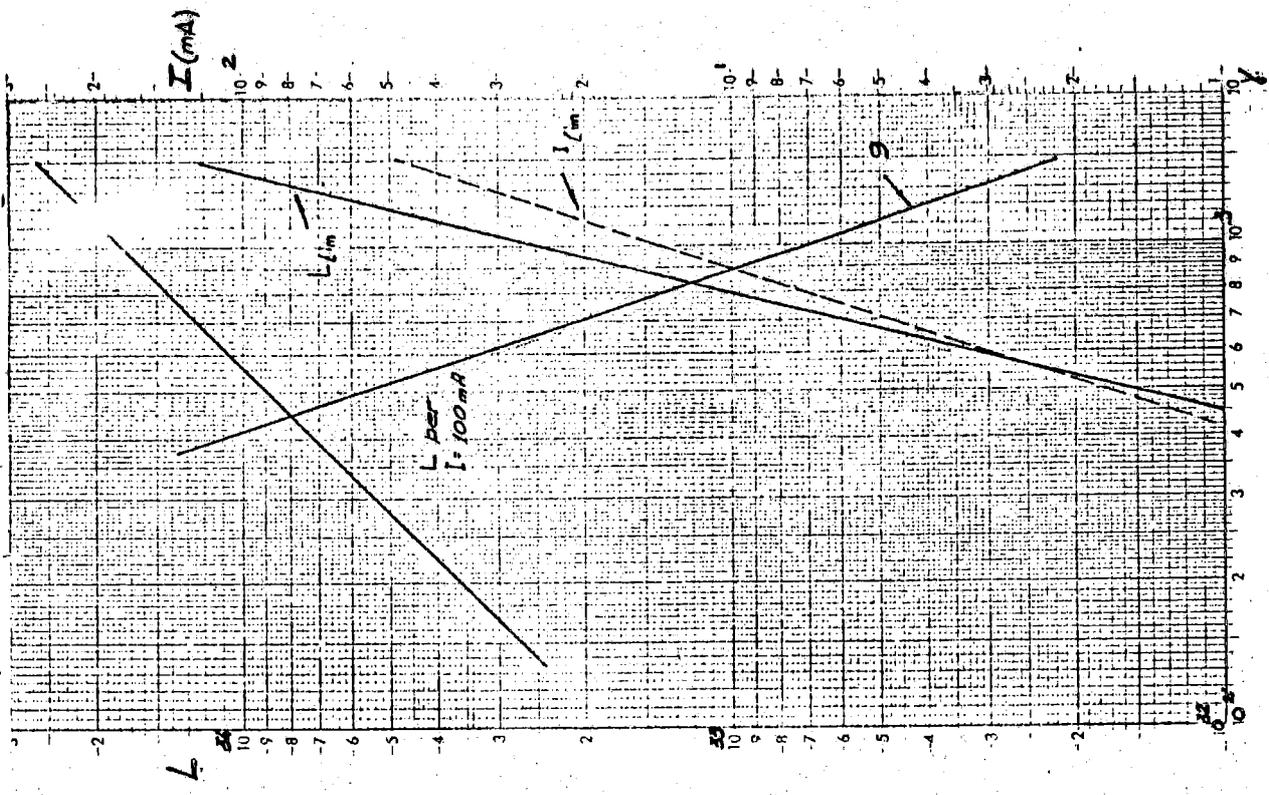


FIG. 41

menteranno così nella stessa proporzione sia I che L, pur restando sempre eguale il punto rappresentativo del funzionamento nel grafico di fig.39.

Le dimensioni naturali del fascio possono essere calcolate con le seguenti formule approssimate:

$$5) \quad w = 0.24 F_r^{1/2} E(\text{GeV}) \sqrt{\lambda R(\text{m}) \left\{ \frac{1}{J_r} + \frac{1}{J_s} \right\}} \quad (\text{cm})$$

$$7) \quad h = 3.03 \times 10^{-5} \frac{F_v^{1/2}}{\nu_v} \sqrt{\frac{\lambda R(\text{m})}{J_v}} \quad (\text{cm})$$

dove: F_r e F_v sono i fattori di forma locali delle oscillazioni di betatrone: $F = \frac{h_{\beta v}}{r R}$; α è il "momentum compaction"; λ è il coefficiente di allungamento, e cioè il rapporto tra la circonferenza complessiva dell'anello e la lunghezza dei magneti curvanti; E, in GeV, l'energia delle particelle; R, in m, il raggio medio dell'anello; J_s, J_r, J_v i coefficienti di smorzamento rispettivamente delle oscillazioni di sincrotrone e di quelle di betatrone radiali e verticali; ν_v il numero di oscillazioni di betatrone verticali per giro.

La dimensione h così calcolata è quella dovuta all'irraggiamento; in realtà, ammettendo che gli errori di allineamento dei quadrupoli diano un coefficiente di accoppiamento $\xi = 10^{-2}$ la dimensione verticale risultante dipende solo dall'accoppiamento e sarà data da:

$$8) \quad h = \xi w \quad \xi = \sqrt{\frac{J_s}{J_r + J_s}}$$

Nella tabella I cap.2) sono raccolte le caratteristiche principali dell'anello da 750 MeV; μ_v , durante il processo di accumulazione, sarà all'incirca pari a $\pi + 20^\circ$, ma durante la sperimentazione potrà essere portato a $\pi + 5^\circ$; assumiamo come punto di funzionamento quello corrispondente a $\mu_v = \pi + 5^\circ$, $\overline{DE} = 5 \times 10^{-5}$ e $\overline{UM}/\overline{UM}_0 = 1$. I valori della corrente limite e della luminosità limite, con coefficiente di ac-

coppiamento $\gamma = 10^{-2}$, saranno dati, in funzione dell'energia, dalle:

9) $I_{lim} = 1,37 \times 10^{-11} \gamma^3$ (A)

10) $L_{lim} = 6,56 \times 10^{17} \gamma^4$ ($cm^{-2} sec^{-1}$)

$= 2,40 \times 10^{21} \gamma^4$ ($cm^{-2} hv^{-1}$)

In fig.41 sono riportati gli andamenti delle grandezze sopracitate in funzione dell'energia; è inoltre riportato l'andamento della luminosità in funzione dell'energia per corrente circolante sia di elettroni che di positroni pari a 100 mA, con densità trasversa uguale a quella limite.

Per ottenere quest'ultima curva, basta ricavare, dalla eq. 4), il coefficiente g , funzione di γ , di cui va aumentata l'altezza efficace del fascio per mantenere la densità trasversa eguale a quella che si ha nel punto di lavoro prescelto; si ottiene:

11) $g = 7,3 \times 10^9 \gamma^{-3}$

La luminosità per $I = 0,1A$ viene ottenuta moltiplicando la luminosità limite L_{lim} per il coefficiente g :

12) $L_{0,1A} = 1,75 \times 10^{31} \gamma$ ($cm^{-2} hv^{-1}$)

Concludendo, se l'intensità dei due fasci è di 100 mA ciascuno, la luminosità può essere di circa $g \times 10^{33} cm^{-2} hv^{-1}$ a 250 MeV e di circa $2,6 \times 10^{34} cm^{-2} hv^{-1}$ a 750 MeV.

Ringraziamenti.

Desideriamo ringraziare i Proff. C. Bernardini e B. Touschek per i suggerimenti e il costante scambio di idee.

BIBLIOGRAFIA.

- (1) - F. Amman, M. Bassetti, M. Bernardini, F. Cattoni, G.F. Corazza, R. Evangelisti, G. Garolla, C. Pellegrini, D. Ritson: "Proposta per la realizzazione di un anello di accumulazione per elettroni e positroni da 1,5 GeV"; Nota interna n. 105, 7 dicembre 1961.
- (2) - C. Bernardini, G.F. Corazza, G. Di Giugno, G. Ghigo, J. Haisinski, P. Marin, R. Querzoli, B. Touschek: "Life time and beam size in a storage ring", LNF-63/23, Nota interna n. 194, 16 aprile 1963.
- (3) - C. Pellegrini: "A calculation of radiation effects on electron oscillations in a circular accelerator", Suppl. Nuovo Cimento 22, 603 (1961).
- (4) - M. Bassetti: "Calcoli numerici sugli effetti di carica spaziale in un anello di accumulazione per elettroni e positroni". LNF-62/35, Nota interna n. 135,5 maggio 1962.
- (5) - L. Mango: "Studio dei parametri di una struttura a funzioni separate con foccheggiamento forte". LNF-62/34, Nota interna n. 134, 3 maggio 1962.
- (6) - A. Cattoni, M. Placidi: "Elementi di progetto per il magnete di ADONE". LNF/Int. AD-62/5.
- (7) - F. Amman e al. v. bibl. n. (1).
- (8) - M. Bernardini, J. Millern G. Tomas, C. Schuhl, C. Tzara: "Mèsure du rendement de conversion negaton-positon". Rapport CEA n. 2212, 1962.
- (9) - Aggson, Burnod: "Production de positrons à l'accelerateur d'Orsey". Rapport LAL.27, ottobre 1962.
- (10) - A. Massarotti, M. Puglisi: "Deflettori impulsati". LNF/Int. AD-62/3/
- (11) - F. Tazzioli: "Misure preliminari alla vasca elettrolitica per lo studio dei profili del deflettore di ADONE". LNF/Int. AD-62/8.
- (12) - M. Puglisi: "Effetto del carico elettronico sulle cavità risonanti delle macchine acceleratrici orbitali". LNF - -62/23. Nota interna n. 126, 7 aprile 1962.
- (13) - A. Massarotti, M. Puglisi: "Studio di un discriminatore di fase per l'accordo dei risuonatori a cavità impiegati nelle macchine acceleratrici". RT/EL(62)14 - CNEN

giugno 1962.

- (14) - G.K. Green, E.D. Courant: "The proton Synchrotron". Handbuch der Physik, 44, 218 (1959):
- (15) - F. Amman, D. Ritson: "Space charge effects in electron-electron and positron-electron colliding or crossing beam rings" Proceeding of the International Conference on High-Energy Accelerators, 1961, pag.471.