

Laboratori Nazionali di Frascati

LNF-62/110 (1962)

F. Amman, M. Bassetti, M. Bernardini, G. Corazza, A. Massarotti,  
C. Pellegrini, M. Placidi, M. Puglisi, F. Tazzioli: GLI ANELLI DI  
ACCUMULAZIONE PER ELETTRONI E POSITRONI AD ALTA ENERGIA  
IN PROGETTO PRESSO I LABORATORI NAZIONALI DI FRASCATI.

Estratto dalla: Ricerca Scientifica, 32(I), 197 (1962)

## **Gli anelli di accumulazione per elettroni e positroni ad alta energia in progetto presso i Laboratori Nazionali di Frascati**

F. AMMAN, M. BASSETTI, M. BERNARDINI, G. F. CORAZZA, L. MANGO,  
A. MASSAROTTI, C. PELLEGRINI, M. PLACIDI, M. PUGLISI, F. TAZZIOLI

Laboratori Nazionali del CNEN - Frascati (Roma)

### **1 - Introduzione.**

Nella ricerca di strumenti che diano sempre maggiori informazioni sulle proprietà delle particelle elementari, in questi ultimi anni si è andato affermando un nuovo principio, quello della sperimentazione con fasci incrociati.

In altri lavori [1-7] sono stati discussi dettagliatamente i vantaggi di questo tipo di sperimentazione rispetto a quella resa possibile dalle macchine acceleratrici convenzionali ed in particolare l'interesse scientifico dell'annichilamento elettrone-positrone ad alta energia; ci limiteremo qui a presentare i progetti in corso di elaborazione presso i Laboratori Nazionali di Frascati per la costruzione di anelli di accumulazione per elettroni e positroni ad alta energia, tra 700 e 1500 MeV.

Agli inizi del 1960 sulla base di una proposta del prof. TOUSCHEK dell'Università di Roma, si iniziò a Frascati la costruzione di un anello per elettroni e positroni, chiamato poi convenzional-

mente ADA [7-9]; in seguito e precisamente in un Congresso tenuto a Frascati nel dicembre 1960, venne discussa la possibilità di costruire anelli di accumulazione per energie maggiori [10].

Il Consiglio Direttivo dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare decise che l'interesse suscitato dalla proposta giustificava un esame approfondito delle possibilità di realizzazione di tale tipo di macchina ed incaricò un piccolo gruppo di studio, costituitosi a questo scopo presso i Laboratori di Frascati, di affrontare il problema in via preliminare e di presentare un progetto di larga massima per un anello da 1500 MeV.

Il valore scelto per l'energia massima è giustificato dal fatto che nell'annichilamento di un elettrone e un positrone da 1500 MeV ciascuno l'energia disponibile di 3000 MeV nel baricentro permette la produzione in coppie di tutte le particelle elementari oggi note, con un'energia cinetica tale da non renderne troppo difficile la rivelazione.

Poiché le sezioni d'urto di annichila-

mento, calcolate nell'approssimazione perturbativa [2], diminuiscono fortemente al crescere dell'energia (Fig. 1), se si vuole mantenere il numero di annichilamenti

di usare un metodo di iniezione diverso da quello adottato per AdA [7, 8] a causa della bassa efficienza di quest'ultimo.

Bisogna ricorrere ad un acceleratore li-

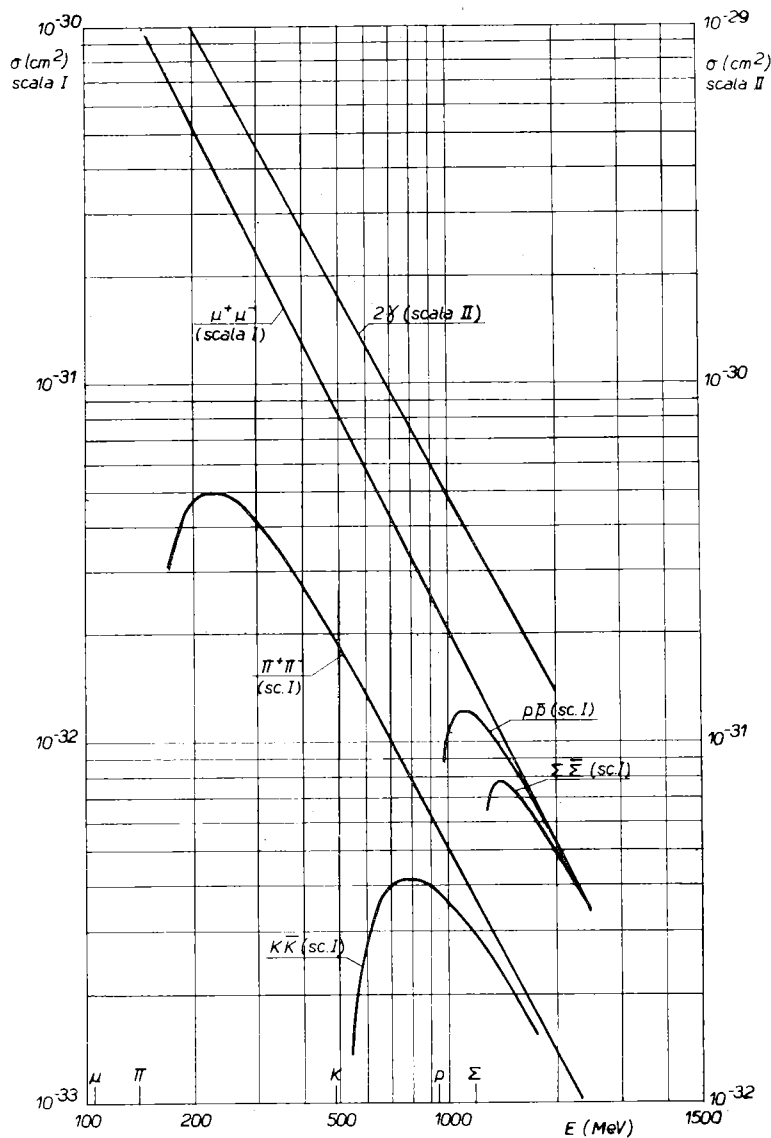


FIG. 1 - Sezioni d'urto totali perturbative per le principali reazioni a due corpi dall'annichilamento  $e^+ + e^-$ .

per unità di tempo a valori ragionevoli, occorre aumentare l'intensità dei fasci circolanti all'aumentare dell'energia dell'anello.

Da ciò segue in primo luogo la necessità

di usare un metodo di iniezione diverso da quello adottato per AdA [7, 8] a causa della bassa efficienza di quest'ultimo. Bisogna ricorrere ad un acceleratore li-

(quanto più grande è tale corrente, tanto minore potrà essere la sua energia finale).

Nonostante l'interesse per gli acceleratori lineari per positroni sia vivo da alcuni anni, nessuno di essi è stato ancora costruito e mancano di conseguenza dati sperimentali sui valori di corrente di positroni ottenibili.

Sorgono inoltre problemi più complessi connessi con l'alta intensità dei fasci circolanti, il cui studio analitico è praticamente impossibile; si ricorre allora a modelli semplificati, per ottenere informazioni qualitative, o a calcoli numerici di controllo per particolari valori dei parametri.

L'incertezza relativa ad alcuni elementi essenziali del progetto, e principalmente relativa alla corrente di positroni che può essere ottenuta con un acceleratore lineare e al comportamento di due fasci di elettroni e positroni assai intensi circolanti nello stesso anello, ci obbliga a tenere considerevoli margini di sicurezza nel progetto stesso, che si riducono essenzialmente ad un aumento dell'energia dell'acceleratore lineare avente le funzioni di iniettore.

Si può vedere che l'energia di iniezione, calcolata con un certo fattore di sicurezza, deve essere intorno ai 500 MeV per un anello da 750 MeV, e intorno agli 800 MeV per un anello da 1500 MeV. Il costo dell'iniettore è quindi preponderante rispetto al costo di tutti gli altri elementi in gioco, e, addirittura, la differenza tra il costo dell'iniettore da 800 MeV e quello da 500 MeV è una notevole frazione del costo totale di un anello da 750 MeV.

Per queste ragioni risulta in definitiva conveniente iniziare con una macchina a minor energia ed un iniettore largamente dimensionato per essa, ma probabilmente sufficiente anche per l'anello di energia maggiore.

Nel dicembre 1961 venne presentata, a conclusione dello studio preliminare, una proposta per la costruzione di due anelli, il primo da 750 MeV ed il secondo

da 1500 MeV [11] da portarsi a termine in tempi successivi.

Tale programma va sotto il nome convenzionale di Adone, inteso come maggiorativo di AdA (*grande anello di accumulazione*).

Il tempo previsto per la realizzazione dell'anello da 750 MeV e del relativo iniettore è piuttosto breve, dell'ordine di tre anni. Il suo funzionamento ci darà le indicazioni necessarie per procedere al progetto e alla costruzione dell'anello da 1500 MeV; qualora ne dovessimo concludere che occorre iniettare ad energia più elevata di 500 MeV, si potranno aggiungere delle sezioni di acceleratore lineare senza particolari complicazioni.

L'acceleratore lineare funzionerà come iniettore degli anelli d'accumulazione per una frazione del tempo totale dell'ordine del 30 ÷ 40 %; per il resto del tempo potrà essere usato come acceleratore di positroni ed elettroni per esperienze di fisica nucleare. Non va trascurato il fatto che anche esso sarà uno strumento di carattere assolutamente nuovo, in quanto capace di fornire elevate correnti medie di positroni ad alta energia.

Nel seguito ci riferiremo soprattutto all'anello da 750 MeV, che è attualmente in corso di progettazione; riteniamo che l'anello da 1500 MeV non differirà da questo nelle sue linee essenziali, se non per le maggiori dimensioni.

## 2 - Principi di funzionamento di un anello di accumulazione.

Nelle sue linee generali un anello di accumulazione è simile ad un sincrotrone: esso comprende un iniettore, un sistema ottico di iniezione, un magnete che mantiene le particelle su un percorso chiuso, un tubo a vuoto spinto, (chiamato per la sua forma, *ciambella*) posto nelle espansioni polari del magnete, un sistema a radiofrequenza il cui compito è di rifornire ai fasci circolanti l'energia persa per irraggiamento.

Gli elettroni e i positroni accelerati nell'iniettore, vengono iniettati in molti impulsi successivi nella *ciambella* sinché viene raggiunta l'intensità totale voluta; terminato il processo di accumulazione, i due fasci, che, data la diversità di carica, percorrono la stessa orbita con velocità opposte, vengono lasciati circolare ed inizia l'osservazione degli eventi di annichilamento elettrone positrone.

Come avviene in un sincrotrone, anche in un anello di accumulazione i fasci non sono distribuiti uniformemente lungo l'orbita, ma sono raggruppati in uno o più pacchetti, il cui numero è uguale al rapporto tra la frequenza di alternanza del campo elettrico a radiofrequenza e la frequenza di rotazione delle particelle, rapporto che prende il nome di armonica dell'impianto a radiofrequenza. In conseguenza della non uniforme distribuzione dei fasci lungo l'orbita, si ha un numero discreto di zone di incrocio fra i fasci pari al doppio del numero di *pacchetti* per fascio, cioè al doppio dell'armonica della radiofrequenza.

L'intensità dei fasci diminuisce col tempo, principalmente a causa degli urti degli elettroni e dei positroni contro gli atomi del gas residuo nella *ciambella*, con una costante di tempo, che, in prima approssimazione, dipende solo dalla pressione del gas (è inversamente proporzionale ad essa) e dalla sua natura, non da tutte le altre caratteristiche dell'anello.

Poiché si vuole che il tempo utile per la sperimentazione sia lungo rispetto al tempo necessario per il processo di accumulazione, che assumiamo essere di circa  $30' \div 60'$ , tale costante di tempo, o vita media del fascio, dovrà essere dell'ordine di  $10 \div 20$  ore. Per ottenere ciò occorre che la pressione del gas residuo in *ciambella*, nell'ipotesi che esso sia aria, sia di circa  $10^{-9}$  tor.

Il processo di accumulazione viene poi ripetuto a intervalli di tempo regolari per riportare l'intensità dei fasci al valore iniziale.

Durante l'accumulazione il campo magnetico di guida viene mantenuto ad un valore costante corrispondente all'energia delle particelle in uscita dall'iniettore; deve poi poter essere variato, per portare gli elettroni e i positroni alla energia a cui si vuole compiere l'esperienza; questa variazione può essere però compiuta in tempi relativamente lunghi (dell'ordine dei secondi), tali cioè da non provocare apprezzabili distorsioni di campo dovute a correnti parassite, anche in strutture di ferro non laminato. Il magnete quindi può essere realizzato con materiali e tecniche adatti per correnti costanti.

Alle variazioni di energia delle particelle provvede naturalmente la cavità a radiofrequenza; se esse sono lente, come supposto, la quantità di energia che deve essere fornita al (o ceduta dal) fascio è però trascurabile (tra l'1‰ e l'1%) rispetto alla perdita per irraggiamento, e quindi, in pratica, nella progettazione dell'impianto a radiofrequenza si mette in conto solo l'energia che si deve fornire al fascio per compensare le perdite.

Il moto degli elettroni e dei positroni nell'anello non è però soltanto determinato dal campo magnetico di guida e dal campo elettromagnetico della cavità a radiofrequenza, ma anche dalle forze agenti su di essi dovute alla presenza degli altri elettroni e positroni dei due fasci; queste forze, che dipendono dalla densità di carica nei fasci circolanti, vengono genericamente dette di carica spaziale.

Nel caso di un acceleratore convenzionale, e quindi di un solo fascio, queste forze hanno una qualche importanza solo a bassa energia; l'intensità massima accelerata in un sincrotrone è in generale limitata dagli effetti di carica spaziale all'iniezione, ma, appena l'energia delle particelle aumenta, essi divengono molto rapidamente trascurabili, poiché dipendono dall'inverso del cubo dell'energia (per particelle relativistiche).

Nel caso invece di un anello di accumu-

lazione con due fasci incrociati si trova che gli effetti di carica spaziale hanno una dipendenza lineare dall'energia, e sono quindi sensibili anche ad alta energia, limitando le densità ottenibili a valori piuttosto bassi.

Consideriamo un anello in cui siano accumulati un fascio di elettroni ed un solo positrone; se supponiamo la densità trasversa del fascio di elettroni uniforme, quest'ultimo agisce sul positrone come una lente foceggiante, la cui distanza focale è inversamente proporzionale alla densità di carica del fascio di elettroni.

Essendo la lunghezza di un pacchetto generalmente assai più breve delle lunghezze d'onda di oscillazione, agli effetti del calcolo dell'interazione nella zona di incrocio essa può essere considerata infinitesima; la densità di carica non verrà quindi espressa come densità di volume, ma come densità superficiale, su una sezione trasversa al moto delle particelle.

Se la distanza focale della lente, che rappresenta l'effetto dell'incrocio, diviene paragonabile o minore di una lunghezza caratteristica del sistema foceggiante del magnete, il positrone non oscilla più con ampiezza limitata intorno ad una orbita stabile ma tende ad allontanarsene indefinitamente.

Un effetto analogo si ha in ottica con una successione di lenti convergenti uguali, poste a distanza maggiore del quadruplo della distanza focale di una delle lenti; le dimensioni di un fascio di luce uscente da una sorgente posta ad un estremo del sistema non restano limitate lungo il canale ottico, ma crescono indefinitamente.

Nel caso di instabilità sopra accennato, appena la ampiezza di oscillazione del positrone diviene maggiore della dimensione del fascio di elettroni, l'effetto diminuisce; il positrone tenderà quindi ad una situazione di regime nella quale la sua orbita sarà limitata, ma diversa da quella del fascio di elettroni nelle zone di incrocio.

Il caso con due fasci di intensità confrontabile è assai più difficile da trattare, ma valgono le stesse conclusioni qualitative; se la loro densità trasversa è superiore ad un valore limite i due fasci percorrono orbite diverse che si scostano sempre più, nelle zone di incrocio, al crescere della densità.

Il valore limite di densità trasversa dipende in modo complesso dal tipo di foceggiamento, ma essendo proporzionale all'energia divisa per il raggio e quindi al campo magnetico nei tratti curvanti, non dipende dall'energia massima dell'anello, dato che il campo magnetico massimo è limitato a circa 10 kG dalle proprietà magnetiche del ferro. La densità limite risulta essere dell'ordine di  $10^{11} \div 10^{12}$  elettr/cm<sup>2</sup>.

Per esaminare l'effetto di questa limitazione, esprimiamo la frequenza di interazione per zona di incrocio  $\dot{n}$ , di un evento di sezione d'urto totale  $\sigma$  (in cm<sup>2</sup>), in funzione delle densità trasverse di carica:

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

dove:

$f$ , in s<sup>-1</sup>, è la frequenza di rotazione delle particelle nell'anello;

$k$  è l'ordine dell'armonica della radiofrequenza;

$\rho_+$  e  $\rho_-$  in part/cm<sup>2</sup>, sono le densità trasverse per pacchetto di positroni ed elettroni;

Dalla (1) si può vedere che, non potendo le densità  $\rho_+$  e  $\rho_-$  assumere valori maggiori della densità limite  $\rho_{\text{lim}} \simeq 10^{12}$  part/cm<sup>2</sup>, l'unico mezzo per aumentare  $\dot{n}$  è di aumentare contemporaneamente le intensità e le sezioni trasverse dei fasci, a pari valore di densità.

Se i due fasci sono fatti incrociare in modo che i vettori velocità degli elettroni e dei positroni formino tra loro un angolo  $\alpha$ , si può mostrare che ciò equivale ad aumentare la sezione trasversa dei fasci

stessi, agli effetti sia della velocità di interazione che della carica spaziale.

L'incrocio ad angolo può essere ottenuto differenziando, a mezzo di campi elettrici, le orbite degli elettroni e dei positroni, in modo tale che esse si incrocino all'angolo voluto nelle zone di interazione.

Ritornando alla formula (1), che dà la velocità di interazione per un evento di sezione d'urto  $\sigma$ , essa può essere posta nella forma:

$$(2) \quad \dot{n} = L \sigma \quad (\text{eventi/s}).$$

La luminosità  $L$ , espressa in  $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  o in  $\text{cm}^{-2} \text{h}^{-1}$ , dipende dalle caratteristiche dell'anello; per un progetto si parte da un valore minimo di luminosità  $L_0$  che si vuole ottenere e, in base ad esso, si definiscono i parametri dell'anello.

Nei progetti in corso di elaborazione si è assunto:

$$(3) \quad L_0 \simeq 3 \times 10^{29} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \simeq \\ \simeq 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ h}^{-1}.$$

Per ottenere questo valore di luminosità occorre che le correnti circolanti di positroni ed elettroni, definite come il rapporto tra la carica totale per fascio ed il tempo di rivoluzione, siano dell'ordine di 100 mA.

Mentre per il fascio di elettroni questo valore di corrente non è certamente eccezionale, per quello di positroni esso presenta invece notevoli difficoltà ed impone soluzioni costose; esamineremo questo problema in maggiore dettaglio nel prossimo paragrafo.

Sulle limitazioni dovute alla carica spaziale, caratteristiche delle macchine a fasci incrociati e che tanto peso hanno nel determinare i parametri di un anello d'accumulazione, non si hanno informazioni derivanti da risultati sperimentali; l'anello da 250 MeV, AdA, data la sua energia piuttosto bassa, potrà utilmente lavo-

rare ad intensità inferiori al limite di carica spaziale (come si è già accennato le sezioni d'urto per annichilazione crescono assai rapidamente al diminuire della energia, e quindi la luminosità necessaria è assai minore a bassa energia che ad alta). D'altra parte il meccanismo di iniezione adottato in AdA non permette, attualmente, di ottenere dei fasci circolanti di intensità sufficientemente elevata per una verifica sperimentale delle limitazioni citate.

Molto lavoro, a questo proposito, è stato svolto dal nostro gruppo: dopo uno studio preliminare del fenomeno, in una approssimazione estremamente semplice [12], siamo passati ad un esame assai più accurato, eseguendo numerosi calcoli numerici su un modello più aderente alla situazione reale [13].

Per dare un'idea della complessità del problema, diremo solo che per questi calcoli numerici si è dovuto ricorrere ad uno dei più grossi e rapidi calcolatori oggi esistenti, il 7090 IBM, e che, pur servendosi di un modello ancora abbastanza semplice, il calcolo di un punto, e cioè il calcolo della luminosità per un certo tipo di anello con un valore di corrente per ciascuno dei due fasci, richiede circa mezza ora di tempo. Una sistematica completa in funzione dei tre parametri in gioco (caratteristiche dell'anello e corrente di ciascuno dei due fasci) richiederebbe almeno da 50 a 100 punti rappresentativi; per ora ci siamo limitati al calcolo di circa 20 punti, che sono risultati sufficienti per determinare i valori più convenienti dei parametri dell'anello e per garantire la possibilità di ottenere il valore minimo di luminosità  $L_0$  già citato.

### 3 - L'iniettore.

L'iniettore deve permettere l'accumulazione entro l'anello di due fasci, uno di elettroni ed uno di positroni, di circa 100 mA ciascuno.

Si può vedere che un iniettore che soddisfi tale requisito per il fascio di positroni, a maggior ragione lo soddisferà per il fascio di elettroni; consideriamo quindi innanzi tutto l'accumulazione dei positroni.

L'iniezione nell'anello avviene, più o meno, come in un sincrotrone convenzionale, deflettendo il fascio proveniente dall'iniettore entro la *ciambella*, tangenzialmente al suo asse.

I positroni, iniettati ad una certa distanza dall'orbita principale di equilibrio, inizieranno ad oscillare intorno ad essa con grandi ampiezze, e, dopo un numero di giri che dipende dal rapporto tra la frequenza di oscillazione e quella di rotazione, e che può essere considerato dell'ordine di  $3 \div 4$ , ritorneranno nello stesso punto in cui sono stati iniettati; occorre quindi che il deflettore non presenti ostacoli al percorso dei positroni, sia cioè aperto verso l'asse della *ciambella*, nè provochi, al secondo passaggio dei positroni, un'ulteriore deflessione, che ne aumenterebbe l'ampiezza di oscillazione portando alla loro perdita contro le pareti della *ciambella*.

Il deflettore deve essere quindi una struttura aperta in cui sia possibile generare, per un tempo pari a circa tre o quattro periodi di rotazione nell'anello, un campo elettromagnetico che defletta dell'angolo voluto le particelle uscenti dall'iniettore.

Le perdite per irraggiamento provocano poi lo smorzamento delle oscillazioni intorno all'orbita centrale di equilibrio dei positroni iniettati, con una costante di tempo  $\tau$ , funzione della loro energia e del valore del campo magnetico nei tratti curvanti.

Dopo una costante di tempo, l'ampiezza delle oscillazioni sarà ridotta di un fattore  $e^{-1} = (2,72)^{-1}$ , e cioè al 37 % del valore iniziale; sarà quindi possibile iniettare un nuovo impulso senza che il campo elettromagnetico del deflettore pulsato (che, data la struttura aperta, si propaga

verso l'orbita centrale di equilibrio) perturbi eccessivamente il fascio precedentemente accumulato.

Tenendo conto che il tempo utile di iniezione è pari a circa tre periodi di rotazione, e che il rendimento di cattura da parte della radiofrequenza per i positroni la cui energia è compresa entro una banda di  $\pm 0,5\%$  attorno all'energia sincrona, è di circa il 35 %, si può concludere che l'incremento di corrente circolante per impulso di iniezione è circa uguale alla corrente di positroni  $i_+$  erogata dall'iniettore entro una banda di energia del  $\pm 0,5\%$  attorno all'energia sincrona.

Volendosi ottenere una corrente circolante totale di 100 mA, si ha che il numero di impulsi di iniezione  $M$  necessario per accumulare tale corrente sarà dato da:

$$(4) \quad M = \frac{0,1 \text{ A}}{i_+}$$

Il tempo minimo che deve trascorrere tra due successivi impulsi è pari alla costante di tempo di smorzamento delle oscillazioni  $\tau$ ; il tempo totale  $T$  occorrente per l'accumulazione di 100 mA di positroni sarà allora:

$$(5) \quad T = M \tau = \tau \frac{0,1 \text{ A}}{i_+}$$

Fissato allora, come dato di progetto, il tempo totale di accumulazione  $T$ , la (5) dà una relazione tra la costante di smorzamento  $\tau$  e la corrente di picco di positroni ottenibile dall'iniettore; esplicitando la dipendenza di  $\tau$  dall'energia del fascio iniettato e dal campo magnetico nell'anello in corrispondenza dell'energia dell'iniezione, o, meglio, dal raggio di curvatura, che a sua volta è funzione dell'energia massima dell'anello, si ottiene:

$$(6) \quad E_{in} \simeq E_{max}^{2/3} i_+^{-1/3}$$



dove

$E_{in}$  (in GeV) è l'energia di iniezione;

$E_{max}$  (in GeV) è l'energia massima dell'anello;

$i_+$  (in  $\mu A$ ) è la corrente di positroni in uscita dall'iniettore entro una banda di energia del  $\pm 0,5\%$ .

La (6), calcolata nell'ipotesi di tempo totale di accumulazione dei positroni pari

quali sarà quello che, a parità di fattore di merito, ha il minimo costo.

In Fig. 2 è rappresentata in diagramma la relazione (6) per due valori di  $E_{max}$ , 1,5 GeV e 0,75 GeV; si vede chiaramente quanto diminuisca l'energia di iniezione necessaria, al crescere della corrente di positroni disponibile. Sulle ascisse del diagramma in Fig. 2 è riportata anche la frequenza di ripetizione degli impulsi di iniezione, che nelle nostre ipotesi è uguale

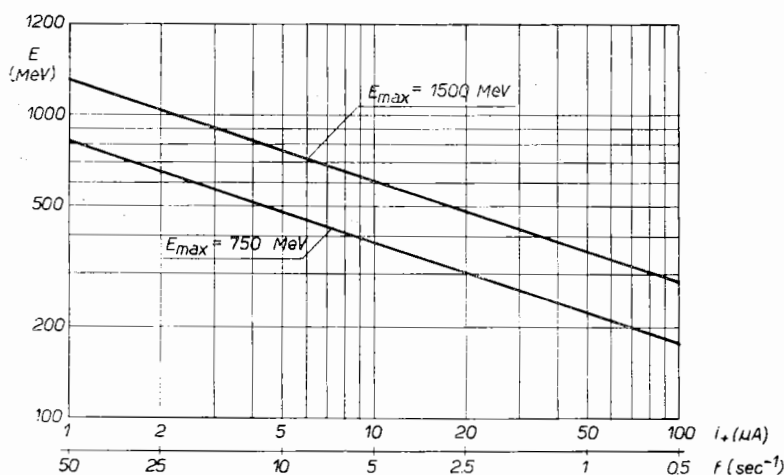


FIG. 2 - Energia di iniezione  $E_{in}$  in funzione della corrente di positroni  $i_+$  e della frequenza di ripetizione degli impulsi di iniezione  $f$  per due valori di energia massima  $E_{max}$  dell'anello di accumulazione.

a mezz'ora, corrente accumulata di positroni di 100 mA, struttura magnetica dell'anello con tratti curvanti pari a un terzo della lunghezza totale dell'orbita principale, e campo magnetico massimo di 10 kG, è la relazione che lega le caratteristiche dell'iniettore ( $E_{in}$  e  $i_+$ ) a quelle dell'anello (delle quali è rimasta esplicitata solo l'energia massima  $E_{max}$ , potendosi definire tutte le altre indipendentemente dal tipo di anello).

Dalla (6) si vede che, per un certo valore di  $E_{max}$ , l'iniettore deve essere scelto in modo che il prodotto  $E_{in} i_+^{1/3}$  assuma un valore determinato; il prodotto  $E_{in} i_+^{1/3}$ , può quindi essere considerato come parametro caratteristico, o fattore di merito, dell'iniettore, il più conveniente dei

all'inverso della costante di tempo di smorzamento, ed è quindi inversamente proporzionale a  $i_+$ , come mostra la (5).

L'unica macchina che, allo stato attuale della tecnica, permetta di disporre di intensi fasci di positroni accelerati ad energie dell'ordine di alcune centinaia di MeV, è l'acceleratore lineare [14]; i positroni vengono prodotti nella cascata elettromagnetica ottenuta frenando un intenso fascio di elettroni in un convertitore.

La disposizione più conveniente prevede una prima sezione di acceleratore lineare ad alta corrente, il convertitore, ed infine una seconda sezione di acceleratore lineare che accelera una certa frazione dei positroni prodotti nel converti-

tore da un'energia di  $5 \div 10$  MeV sino all'energia finale voluta.

L'acceleratore lineare è composto quindi di due parti, le cui caratteristiche differiscono notevolmente tra loro; poiché il numero di positroni al massimo dello sciame è all'incirca proporzionale alla potenza del fascio di elettroni incidente sul convertitore, e, d'altra parte, si può assumere, in primissima approssimazione, che il costo dell'acceleratore lineare sia proporzionale alla potenza a microonde da esso richiesta, converrà che nella prima parte sia reso massimo il rendimento nel trasferimento di potenza dal campo elettromagnetico al fascio di elettroni; nel secondo tratto invece, essendo molto deboli le correnti di positroni da accelerare, la potenza trasferita al fascio è comunque piccola, e conviene quindi realizzare una struttura con basse perdite, in cui cioè sia massimo il rapporto tra l'integrale del campo elettrico lungo un certo tratto di guida acceleratrice e la potenza dissipata nello stesso tratto di guida.

Il processo di conversione elettroni-positroni a bassa energia (tra 10 e 100 MeV) è stato studiato da vari A. [15, 16]; introducendo alcune approssimazioni è possibile ottenere delle formule semplici per il rendimento di conversione e la distribuzione in angolo e in energia dei positroni prodotti.

Servendosi di queste formule e conoscendo l'accettanza in angolo e energia del tratto di acceleratore lineare che segue il convertitore, si può calcolare l'intensità del fascio di positroni che può essere accelerato in funzione delle caratteristiche (energia e intensità) del fascio di elettroni incidente sul convertitore.

L'uso di opportune lenti magnetiche aumenta l'intensità dei positroni accettati a parità di condizioni del fascio di elettroni, ma i calcoli relativi sono piuttosto complessi, trattandosi, in generale, di lenti con distanze focali confrontabili con l'apertura, nelle quali quindi le aberrazioni hanno un peso notevole.

Il rendimento complessivo nella conversione elettroni positroni, intendendo per esso il rapporto tra il numero di positroni accelerati e quello degli elettroni incidenti sul convertitore, è assai difficilmente calcolabile con sufficiente accuratezza, nè esistono, a tutt'oggi, risultati sperimentali.

Nello scorso mese di marzo sono state eseguite da parte del nostro gruppo, in collaborazione col gruppo di C. Tzara del Commissariat pour l'Energie Atomique (France) alcune misure sulla produzione di positroni con fasci di elettroni di energia tra 10 e 30 MeV. Le misure sono state eseguite con l'acceleratore lineare da 30 MeV di Saclay (Francia): i risultati sono ora in corso di elaborazione ma già i primi dati mostrano che le teorie approssimate [15, 16] cadono in difetto per i valori più bassi di energia degli elettroni (tra 10 e 20 MeV).

Con questi dati sperimentali, l'incertezza nel rendimento complessivo di conversione verrà limitata al rendimento di cattura e accelerazione nel secondo tratto di acceleratore lineare; per quest'ultimo si cercherà di ottenere dei dati attendibili servendosi di calcoli numerici. Non è comunque difficile prevederne un limite inferiore.

Il processo prevede la conversione ad un'energia del fascio di elettroni di 30 MeV; in questo caso il valore del rendimento complessivo di conversione può essere assunto, con ipotesi abbastanza conservative, pari a circa  $(2 \div 4) \times 10^{-5}$ .

Ciò significa che con una corrente di  $0,5 \div 0,6$  A di elettroni a 30 MeV incidente sul convertitore, la corrente di positroni accelerata sarà dell'ordine di  $10 \div 25$   $\mu$ A; almeno metà di essa avrà un'energia compresa in una banda del  $\pm 0,5$  % intorno all'energia media finale. Dal diagramma in Fig. 2 si ricava che l'energia dell'acceleratore lineare, per  $i_{\pm} = 5 \div 12$   $\mu$ A, si aggira tra 350 e 500 MeV per l'anello da 750 MeV, e tra 550 e 800 MeV per l'anello da 1500 MeV.

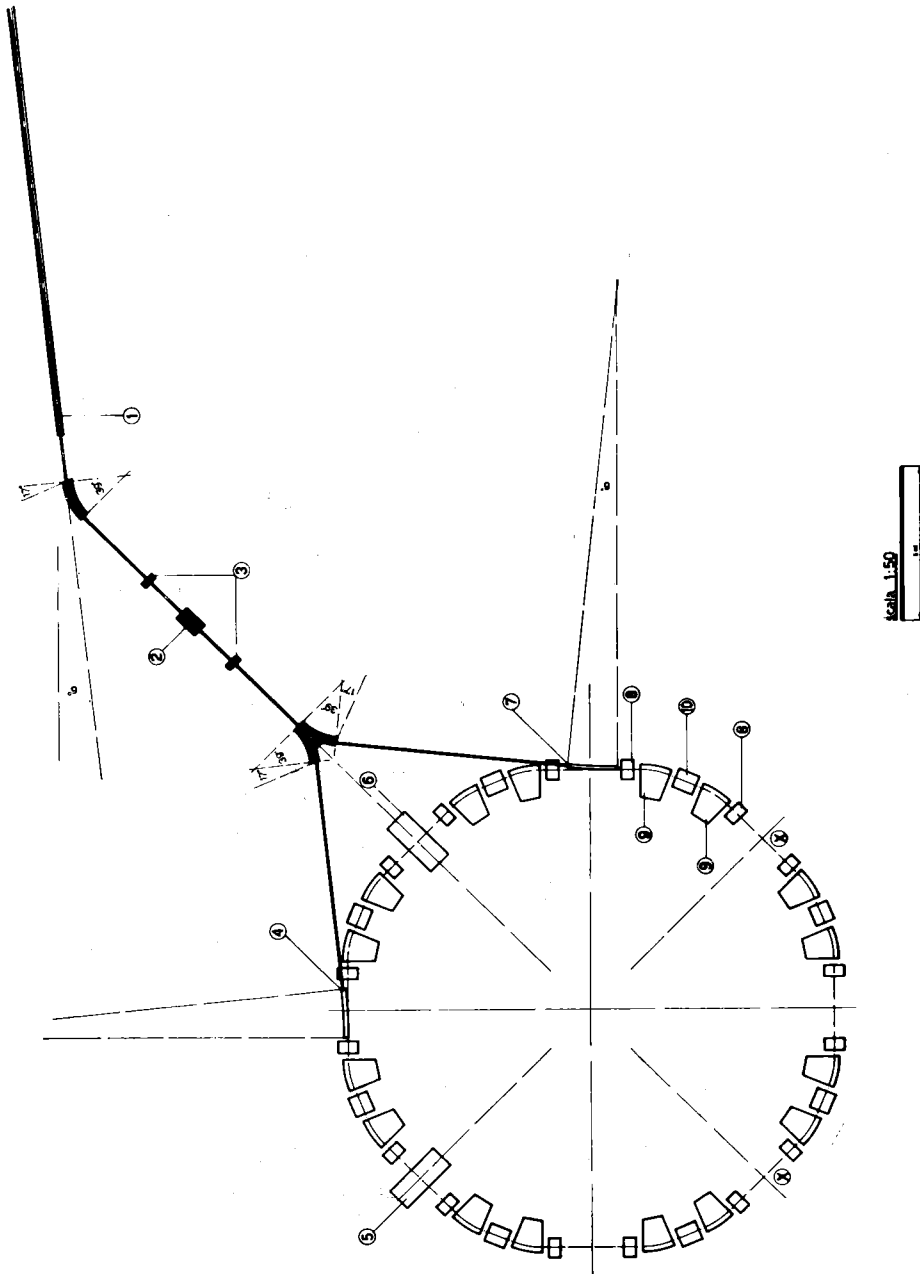


Fig. 3 - Anello di accumulazione da 750 MeV; schema di insieme. 1 - Acceleratore lineare; 2 - Quadrupolo per canale di positroni; 3 - Quadrupoli per canale di elettroni; 4 - Deflettore pulsato per positroni; 5 e 6 - Cavità acceleratrici a radiofrequenza; 7 - Deflettore pulsato per positroni; 8 - Quadrupoli focheggianti sul piano radiale; 9 - Magneti curvanti; 10 - Quadrupolo defocheggiante sul piano radiale; X - Zone di incrocio dei fasci riservate alla sperimentazione.

Ne viene di conseguenza che un acceleratore lineare da 500 MeV sarà certamente in grado di soddisfare i requisiti posti da un anello da 750 MeV, considerando le ipotesi più pessimistiche, e molto probabilmente, sarà pure in grado di iniettare convenientemente in un anello di maggiore energia. Qualora occorresse, non sarà comunque difficile, in un secondo momento, accrescere l'energia massima dell'acceleratore lineare: la sua struttura modulare rende possibile, ed economicamente conveniente, un tale programma.

Abbiamo considerato sin qui l'iniezione dei soli positroni; per gli elettroni l'operazione è assai più semplice.

L'accelerazione degli elettroni nell'acceleratore lineare viene effettuata togliendo il convertitore e cambiando la fase relativa del campo elettrico accelerante tra il primo e il secondo tratto, operazioni che potranno richiedere un tempo di pochi secondi.

A causa delle già citate caratteristiche del secondo tratto di acceleratore lineare, la corrente di elettroni in uscita non potrà essere molto elevata: sarà comunque sempre alcuni ordini di grandezza maggiore di quella di positroni.

Con il tipo di acceleratore lineare che stiamo considerando, la corrente di elettroni compresa entro una banda di energia del  $\pm 0,5\%$  sarà maggiore od uguale a 20 mA: ciò significa che l'accumulazione degli elettroni nell'anello può avvenire in soli cinque impulsi di iniezione.

#### 4 - L'ottica di iniezione e il deflettore pulsato.

Compito del sistema ottico di iniezione è il trasporto dei fasci di elettroni e positroni dall'uscita dell'acceleratore lineare al rispettivo deflettore.

Esso deve soddisfare ad alcune condizioni: innanzitutto deve essere acromatico, non deve cioè introdurre in uscita, delle

correlazioni tra energia e angoli o scostamenti rispetto alla traiettoria principale; deve produrre, inoltre, in uscita, un'immagine di minima confusione con ingrandimento angolare prefissato, tale da rendere massimo il rendimento di iniezione.

Il fascio in uscita dall'iniettore è infatti una sorgente estesa con piccola apertura angolare; un sistema di lenti non può cambiarne l'emittanza (equivalente dell'invariante di Lagrange nei sistemi ottici lineari centrati), ma a pari emittanza, può variarne la dimensione e l'apertura angolare.

La struttura magnetica dell'anello e l'emittanza del fascio in uscita dall'iniettore definiscono quali debbono essere le dimensioni e l'apertura angolare ottime del fascio stesso all'ingresso nel magnete, e quindi l'ingrandimento del sistema ottico di iniezione.

In Fig. 3 si vede lo schema del sistema ottico di iniezione per l'anello da 750 MeV: ambedue i canali, per elettroni e positroni, sono acromatici e afocali. Mentre i magneti curvanti sono comuni ai due canali, le lenti quadrupolari debbono essere diverse; durante l'iniezione di elettroni saranno quindi alimentate solo quelle relative al canale di  $e^-$  e viceversa durante l'iniezione di positroni.

Come accennato nel par. 3, il deflettore pulsato è una struttura aperta verso l'interno della ciambella in cui occorre generare, per un tempo dell'ordine di  $0,5 \div 1 \mu s$ , un campo elettromagnetico tale da deflettere le particelle di un angolo prefissato, che, nel nostro caso, è di 0,1 rad.

L'impulso di campo in funzione del tempo deve essere rettangolare, con tempi di salita e di discesa brevi rispetto al periodo di rotazione, dell'ordine quindi di  $0,1 \mu s$  e con valore massimo costante durante l'impulso, e da impulso a impulso, entro  $2 \div 4\%$ .

Questi requisiti impongono una soluzione a *linea*, e cioè o con costanti distribuite, oppure con un grande numero di

elementi, ciascuno dei quali a costanti concentrate; l'impulso sarà ottenuto connettendo, con opportuno interruttore rapido, quale può essere una *spark-gap*,

di valore uguale alla sua impedenza caratteristica.

Le potenze istantanee in gioco sono assai elevate: dell'ordine di  $500 \div 1000$

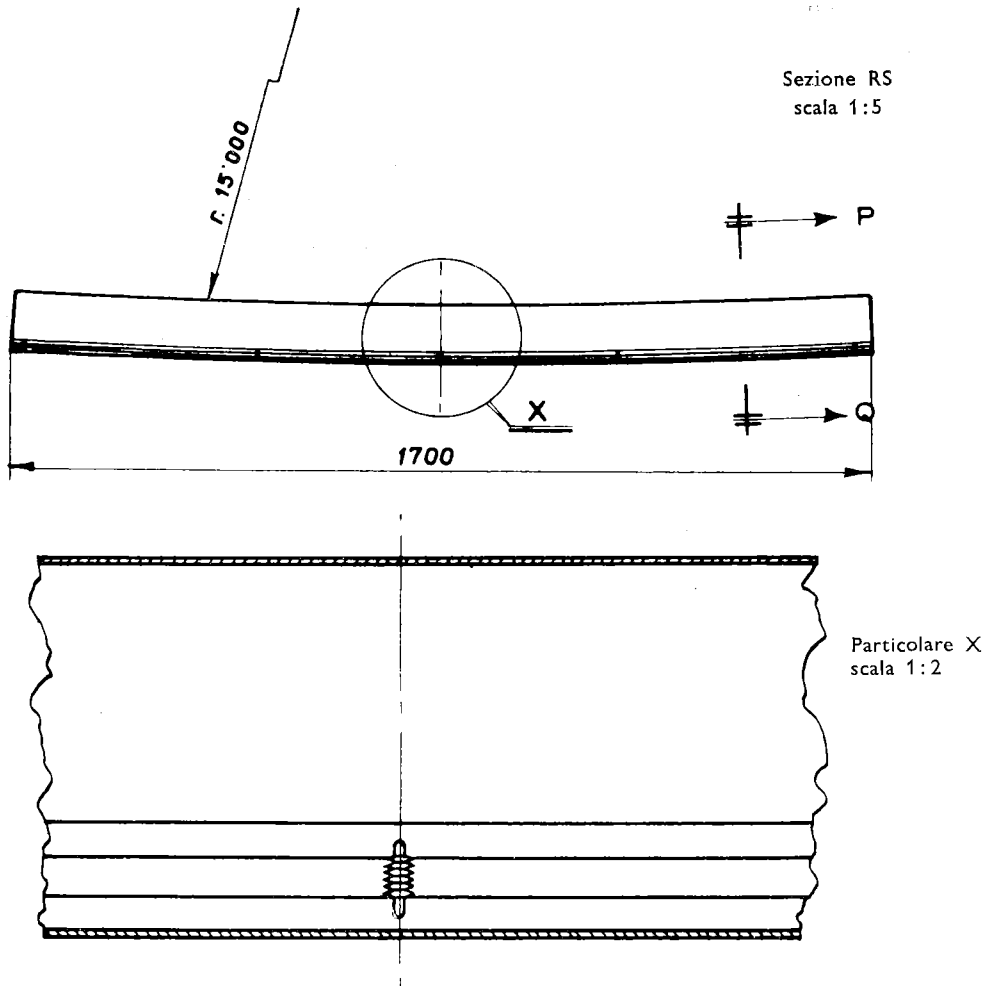


FIG. 4 - Deflettore pulsato in aria: schema di massima.

una linea formatrice di impulso al deflettore.

Grande cura va posta nell'adattamento dei vari elementi; le impedenze caratteristiche della linea formatrice di impulso e del deflettore debbono essere uguali, per non provocare riflessioni di corrente o di tensione, ed inoltre il deflettore deve essere chiuso su una resistenza

MW; un'ulteriore complicazione è dovuta al fatto che il deflettore va posto all'interno della ciambella, e quindi in alto vuoto: si debbono quindi realizzare dei passanti, per la sua alimentazione, a perfetta tenuta di vuoto e di opportune caratteristiche elettriche; la struttura del deflettore deve inoltre poter essere riscaldata a circa  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$  per il degassamento.

Due sono i tipi di deflettore che stiamo attualmente considerando: il primo è in aria, ed è schematicamente rappresentato nella Fig. 4; la Fig. 5 mostra un mo-

magnete in ferrite: in questo caso alla deflessione contribuisce solo il campo magnetico.

Un deflettore più perfezionato a ferrite

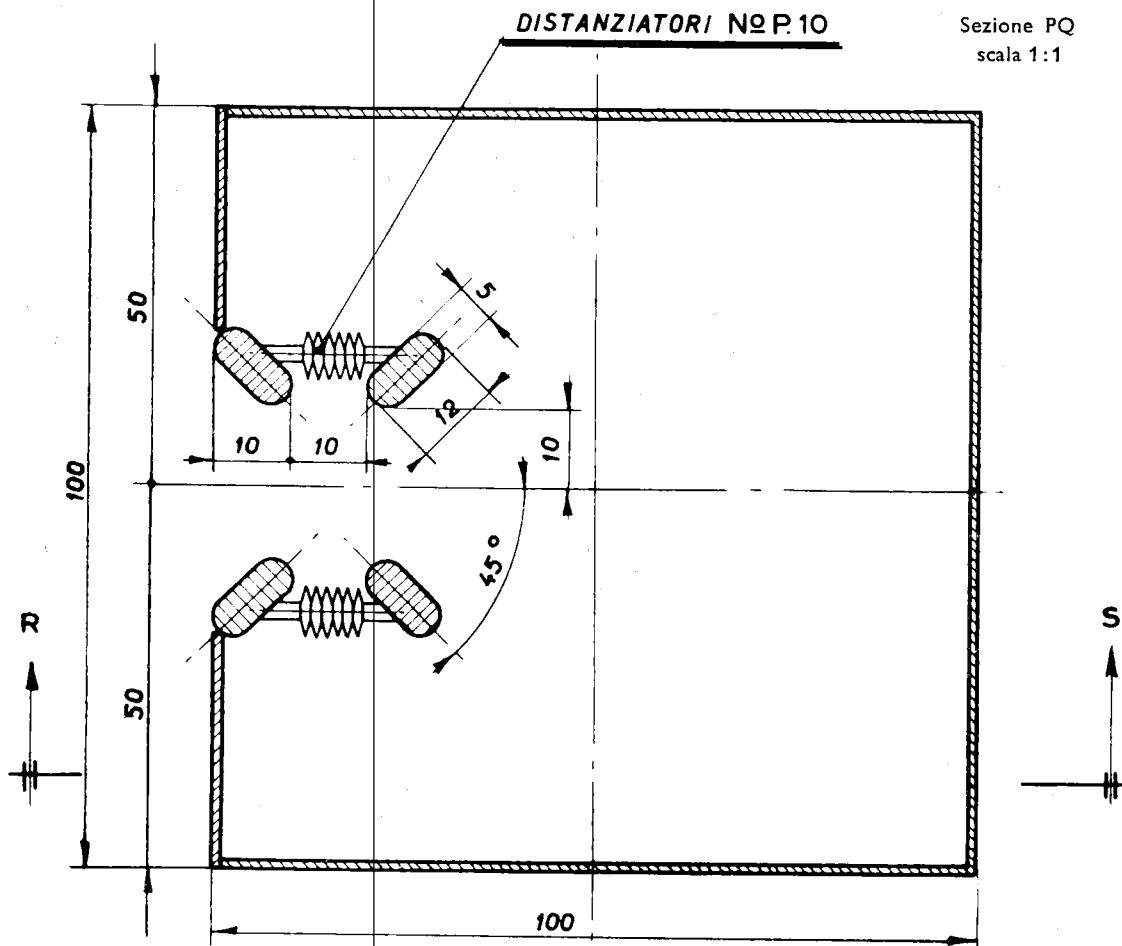


FIG. 4 - Deflettore pulsato in aria: schema di massima.

dello di questo tipo di deflettore attualmente in studio. La forma dei conduttori va ulteriormente perfezionata, studiando l'andamento dei campi elettrici e magnetici in vasca elettrolitica, per ottenere un campo quanto più uniforme possibile nella zona utile.

Un secondo tipo possibile di deflettore, simile a quello usato da O'Neill nell'anello per elettroni di Stanford [17], è costituito da una successione di elementi di

è in uno stadio di avanzata costruzione al CERN per l'estrazione del fascio di protoni dal protosincrotrone da 25 GeV [18].

I deflettori a ferrite hanno il vantaggio di poter maggiormente delimitare lo spazio in cui è concentrata l'energia del campo elettromagnetico ad una zona poco più ampia di quella effettivamente occupata dal fascio, e quindi di richiedere minori potenze a parità di deflessione, e di dare un campo più uniforme nella zona utile.

Essi presentano però notevolissime difficoltà quando si consideri la necessità di porli in alto vuoto; il riscaldamento della ferrite a 300 °C, necessario per il degasamento, ne varia le proprietà magnetiche rendendone problematico il funzionamento.

Per queste ragioni nel nostro gruppo si

In una macchina a ciclo magnetico alternato, ad esempio, è assai importante ridurre al minimo le dimensioni del traferro, e quindi l'energia in esso immagazzinata; il circuito di alimentazione comprende infatti degli elementi (condensatori o volano) in cui, al diminuire dell'induzione nel traferro, viene trasferita l'e-

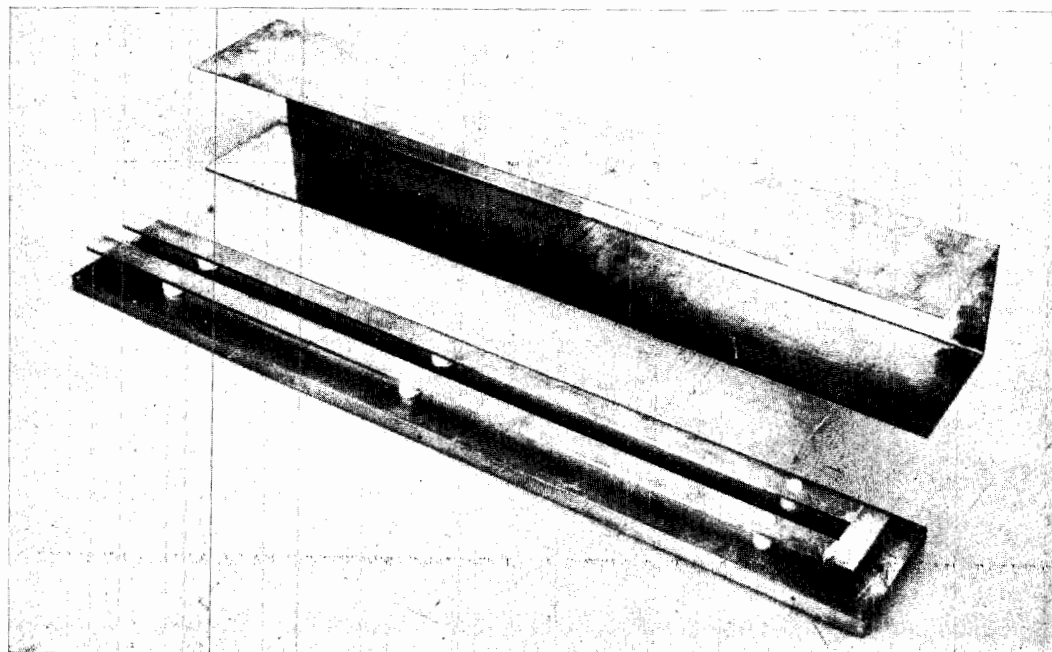


FIG. 5 - Deflettore pulsato in aria: modello in scala ridotta usato per le prove.

considera, per ora, con maggiore attenzione la soluzione in aria; non è da escludersi infatti che con una particolare sagomatura dei conduttori la potenza richiesta da questo tipo di deflettore in definitiva non superi di molto quella richiesta da un deflettore a ferrite.

##### 5 - Il magnete.

I requisiti in base ai quali si decide la scelta della struttura foccheggiante del magnete, nel caso di un anello di accumulazione, non sono esattamente gli stessi che vanno presi in considerazione nel caso di un sincrotrone.

nergia magnetica, ed il cui costo cresce naturalmente al crescere del volume del traferro.

In un anello d'accumulazione il campo magnetico è praticamente costante nel tempo: le variazioni occorrenti per portare l'energia dei fasci accumulati al valore voluto non sono tanto frequenti da giustificare un impianto di alimentazione con recupero dell'energia magnetica immagazzinata nel traferro; un maggiore volume di traferro costa quindi relativamente poco, in quanto richiede solo un maggiore peso di ferro e di rame e una maggiore potenza del generatore in corrente continua.

Mentre quindi in un sincrotrone si sceglie il tipo di foccheggiamento che permette di rendere minime le dimensioni del traferro, altre considerazioni entrano in gioco nella progettazione di un anello d'accumulazione.

Il foccheggiamento forte, ottenuto con una successione di lenti magnetiche convergenti e divergenti [19], presenta due fondamentali vantaggi, nella realizzazione di un anello di accumulazione, rispetto al foccheggiamento debole, o a gradiente costante: una minore dispersione e, in particolari condizioni, un valore maggiore di densità trasversa al limite di carica spaziale. (La dispersione di una struttura è tanto maggiore quanto più grande è la differenza di lunghezza delle orbite di equilibrio di due particelle di energia diversa).

Una bassa dispersione è assai importante in un anello di accumulazione sia perché permette di iniettare una maggiore banda di energia, e quindi una maggiore frazione dei positroni accelerati da un acceleratore lineare, sia perché permette di lavorare con minori tensioni di radiofrequenza nelle cavità acceleratrici.

Come è stato accennato, le cavità a radiofrequenza riforniscono ai fasci, in media, la potenza perduta per irraggiamento; poiché però il fenomeno dell'irraggiamento non è continuo, ma avviene attraverso l'emissione di singoli fotoni, si ha un effetto di fluttuazione nell'energia delle varie particelle intorno all'energia sincrona.

Come è noto dalla teoria del sincrotrone [20], la fase di una particella, la cui energia è diversa da quella sincrona, varia nel tempo con una legge analoga a quella che regge il moto di un pendolo; la costante di richiamo è proporzionale alla tensione delle cavità e inversamente proporzionale alla dispersione del magnete.

Perché le fluttuazioni dovute all'irraggiamento non provochino la perdita del fascio in un tempo più breve della vita media dovuta al gas residuo, occorre che la costante di richiamo sia maggiore di un

certo valore, e quindi la tensione di radiofrequenza necessaria sarà tanto minore quanto minore è la dispersione del magnete.

Contro i vantaggi succitati, una normale struttura a foccheggiamento forte (quale quella usata nei protosincrotroni da 25 GeV del CERN, da 30 GeV di Brookhaven, o in altri elettrosincrotroni) presenta uno svantaggio che ne rende impossibile l'uso in anelli di accumulazione per elettroni e positroni: le perdite per irraggiamento rendono antismorzate le oscillazioni di betatrone nel piano orizzontale.

La costante di tempo di antismorzamento, il tempo cioè in cui l'ampiezza massima delle oscillazioni radiali di betatrone aumenta di un fattore  $e$ , dipende dall'energia e dal valore del campo magnetico nei settori curvanti, e può essere dell'ordine di  $0,01 \div 0,1$  s.

Questo effetto di antismorzamento non è però una necessaria conseguenza del foccheggiamento forte; con particolari tipi di strutture esso può essere evitato.

Tutto il problema degli effetti delle perdite per irraggiamento sul moto delle particelle è stato da noi affrontato in maniera organica, data la sua importanza in un anello d'accumulazione [21]; in precedenza esistevano due teorie discordanti [22-24], e quindi il calcolo è stato eseguito seguendo un metodo originale, che ci ha permesso di giungere a risultati applicabili in modo molto generale a qualunque tipo di struttura.

In base al lavoro citato [21] abbiamo studiato due diversi tipi di strutture a foccheggiamento forte, nei quali non si ha antismorzamento [25, 26]; di questi il secondo è preferibile per varie ragioni, e di esso parleremo.

La struttura scelta, rappresentata schematicamente in Fig. 3, è del tipo detto *a funzioni separate*, nella quale cioè il foccheggiamento è ottenuto con quadrupoli e la curvatura con magneti con basso valore di gradiente.



Si può dimostrare [21] che quando, in questo tipo di struttura, nei magneti curvanti l'indice di campo  $n$ , definito come la derivata logaritmica della componente verticale del campo magnetico rispetto al raggio, assume il valore  $n = 0,5$ ,

viene ottenuto semplicemente variando la loro corrente di alimentazione.

I calcoli da noi eseguiti sulle limitazioni dovute alla carica spaziale [13] mostrano una dipendenza piuttosto pronunciata della densità limite dalle proprietà di fo-

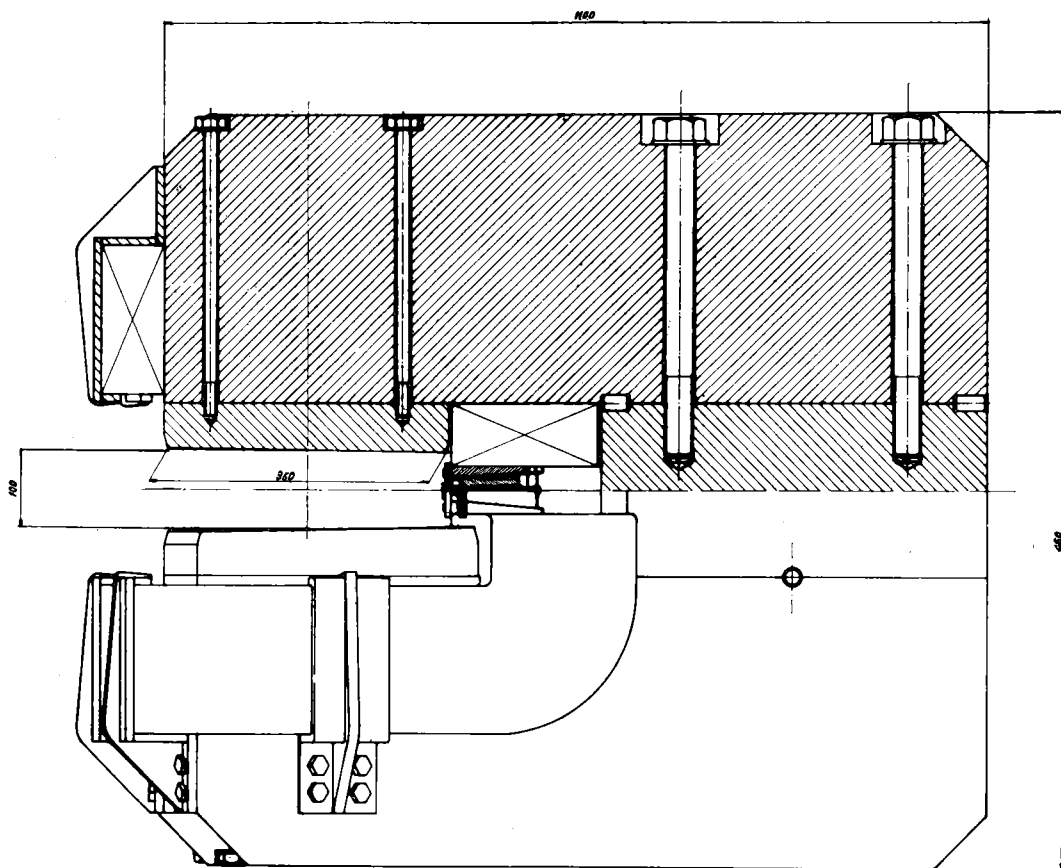


FIG. 6 - Anello da 750 MeV: sezione trasversa di un magnete curvante.

si ha smorzamento delle oscillazioni indipendentemente da tutte le altre condizioni di foccheggiamento, qualunque siano cioè la disposizione delle lenti quadrupolari ed i loro gradienti.

Questo quindi è un primo vantaggio di una struttura a funzioni separate nella quale i magneti curvanti abbiano  $n = 0,5$ .

Altro vantaggio, determinante nella scelta, è la possibilità di variare le proprietà foccheggianti del magnete cambiando i gradienti nei quadrupoli, ciò che

cheggimento; risulta quindi assai conveniente la possibilità di ricercare sperimentalmente le caratteristiche di foccheggiamento che, a pari corrente accumulata, rendono massima la luminosità. Ciò potrà essere fatto, a macchina funzionante, osservando la velocità di interazione per un evento qualunque, ad esempio l'annichilamento in due  $\gamma$ , e cercandone il valore massimo al variare della corrente di alimentazione dei quadrupoli.

Non è da escludersi che la condizione

più favorevole per le limitazioni di carica spaziale non coincida con la condizione più favorevole per l'iniezione; in tal caso il processo di iniezione verrà effettuato

senza richiesta per l'alimentazione. Trattandosi però di magneti a campo costante, questi svantaggi non conducono a rilevanti aumenti nel costo totale dell'anello;

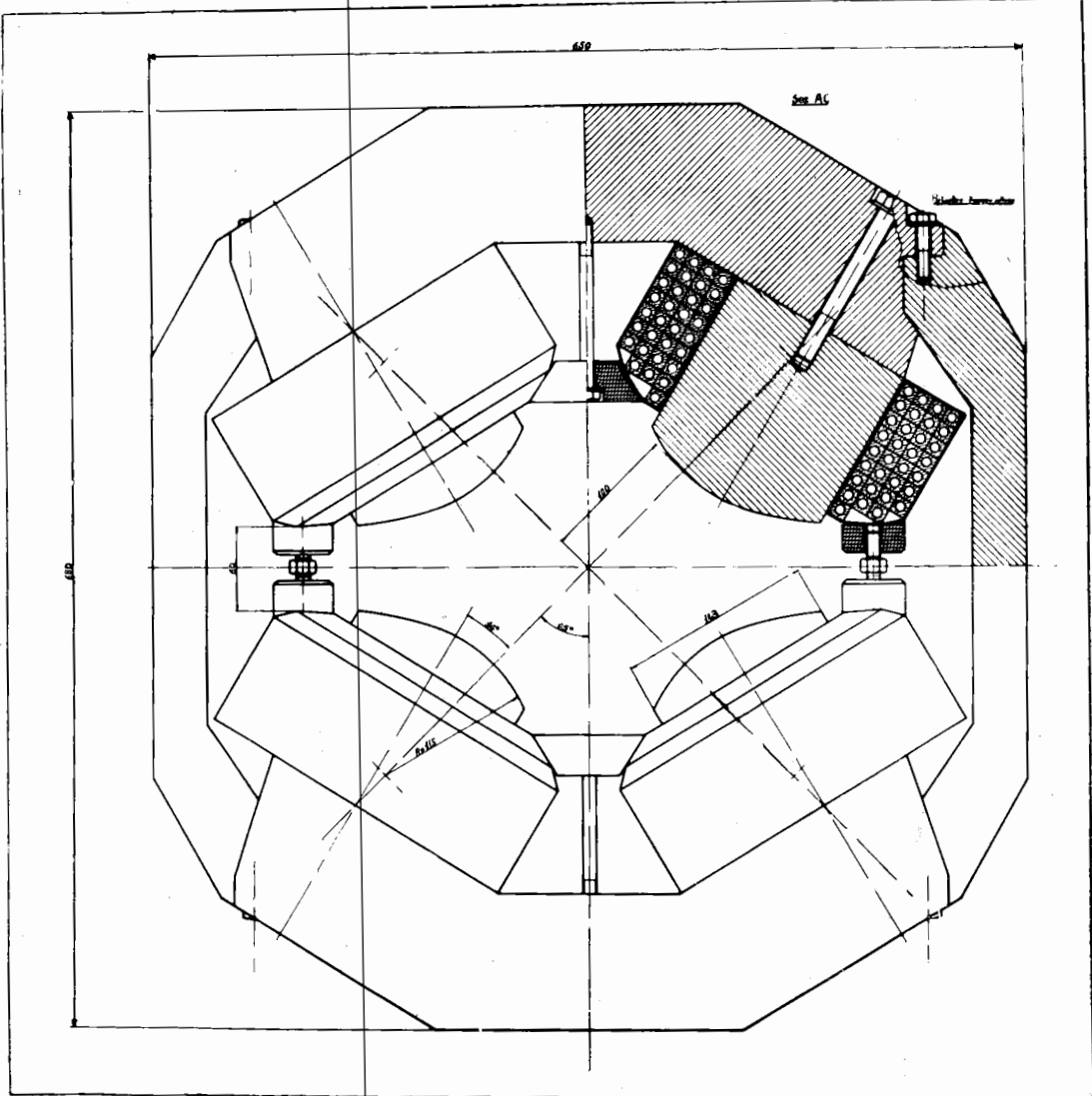


FIG. 7 - Anello da 750 MeV: sezione trasversa di un quadrupolo.

con un certo valore di corrente nei quadrupoli, che verrà poi cambiato al termine di esso.

Una struttura a funzioni separate ha però anche degli svantaggi rispetto a strutture più tradizionali: essi sono le maggiori dimensioni dell'anello e la maggiore po-

confrontato con la maggiore sicurezza di funzionamento connesso con una macchina a parametri variabili a piacere, essi possono essere considerati trascurabili.

In Fig. 6 e 7 sono rappresentate le sezioni di un magnete curvante e di un quadrupolo; l'anello da 750 MeV attualmente

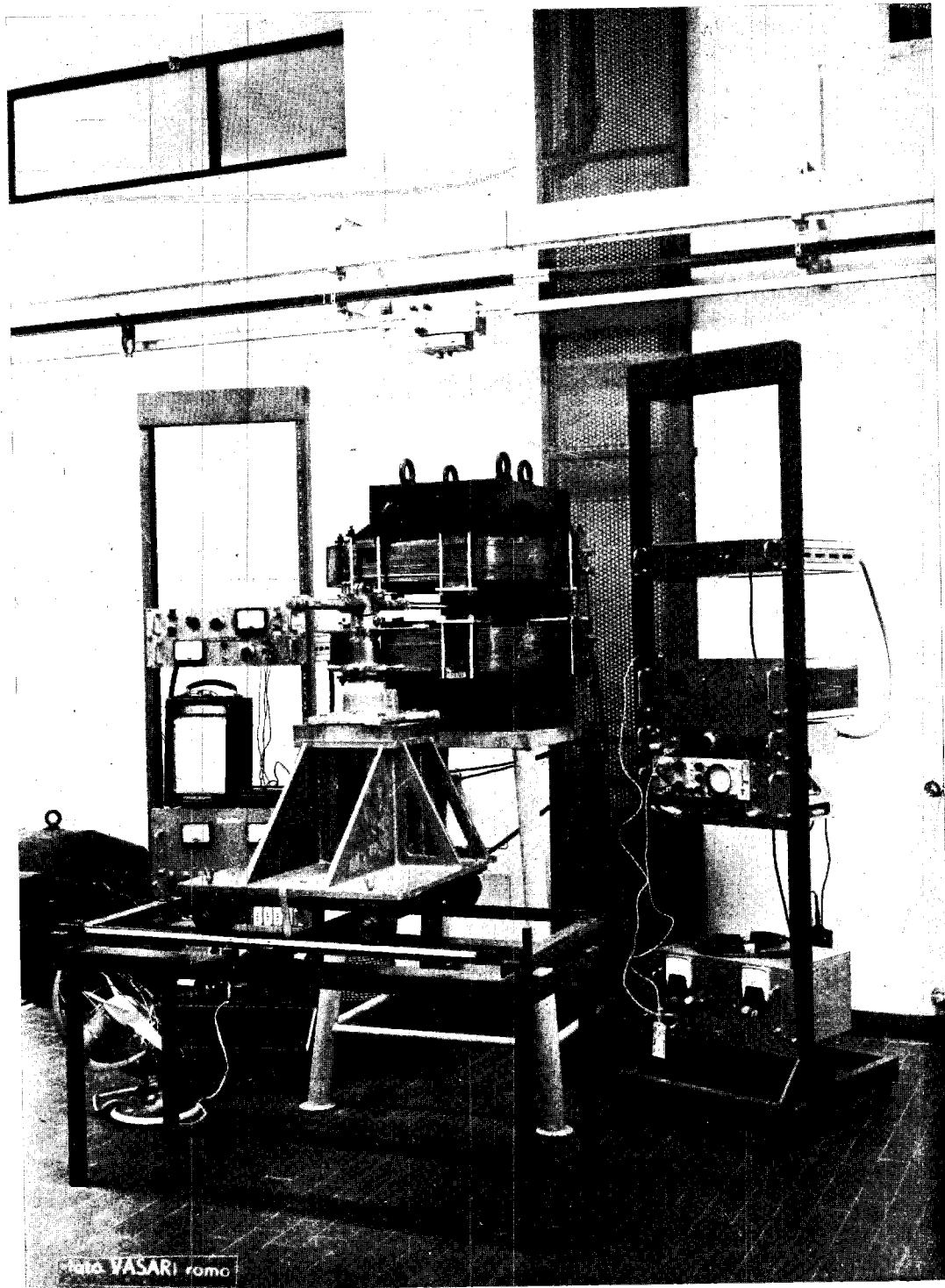


Fig. 8 - Modello in scala ridotta di un magnete curvante.

in progetto è composto di 16 settori curvanti, lunghi circa 90 cm ciascuno (sull'orbita principale), di 16 quadrupoli focheggianti sul piano radiale, lunghi circa 40 cm ciascuno, e di 8 quadrupoli defocheggianti sul piano radiale, lunghi circa 70 cm ciascuno; la lunghezza complessiva dell'orbita principale è di 50 m.

In corrispondenza dell'energia massima di 750 MeV il campo magnetico nei settori curvanti è di 10 kG, ed il gradiente nei quadrupoli, per la condizione tipo di focheggiamento (2,25 oscillazioni di betatrone per giro), è di 250 G/cm.

Nel progettare il magnete abbiamo particolarmente curato la disponibilità di spazio nelle sezioni diritte; in esse infatti si hanno le zone di incrocio dei fasci e quindi debbono trovare posto gli apparati sperimentali per la rivelazione delle particelle prodotte nelle reazioni di annichilamento. Le sezioni diritte sono lunghe 2 m ciascuna; lo spazio effettivamente a disposizione per gli apparati sperimentali è di circa 1,6 m.

Le zone di incrocio saranno quattro, essendo due l'ordine dell'armonica della radiofrequenza: in corrispondenza di due di esse vi saranno le cavità acceleratrici (che vanno poste in una zona di incrocio, ed anzi la definiscono); le altre due saranno a disposizione per le esperienze.

Il magnete è attualmente in corso di progettazione; parallelamente si procede a misure su modelli in scala ridotta (in Fig. 8 è mostrato appunto un modello di settore curvante), e a rilievi di campi magnetici con metodi analogici, ausili necessari al lavoro di progetto.

## 6 - Il sistema di vuoto.

Il sistema di vuoto di un anello d'accumulazione deve essere in grado di portare e mantenere la pressione nella *ciambella* ad un valore minore od al più uguale a  $10^{-9}$  tor.

Nel nostro caso la ciambella è un tubo

a sezione approssimativamente ellittica, di assi pari a 9 cm e 22 cm circa, lungo 50 m.

Le tecniche dell'ultravuoto, per pressioni cioè dell'ordine di  $10^{-9}$  tor, sono radicalmente diverse da quelle usate per vuoti dell'ordine di  $10^{-6}$  tor. Infatti in un impianto convenzionale per vuoti dell'ordine di  $10^{-6} \div 10^{-7}$  tor la limitazione al raggiungimento di un vuoto limite inferiore è essenzialmente dovuta al degassamento specifico delle pareti del recipiente da vuotare.

Per l'acciaio inox il valore del degassamento specifico a temperatura ambiente è di circa  $10^{-8}$  tor l/s cm<sup>2</sup> e pertanto, poiché

$$(7) \quad SP = qA$$

dove:

$S$  = portata della pompa (l/s)

$P$  = pressione limite desiderata (tor)

$q$  = degassamento specifico (tor l/s cm<sup>2</sup>)

$A$  = superficie interna del recipiente da vuotare (cm<sup>2</sup>)

per raggiungere una pressione di  $10^{-9}$  tor in un recipiente con superficie interna  $A$  uguale a 1 m<sup>2</sup> dovremmo disporre di un impianto con pompa della portata di 100 000 l/s.

È necessario quindi ridurre il degassamento specifico del recipiente a valori più bassi; ciò si ottiene riscaldando preventivamente, sotto vuoto, il recipiente stesso sino a temperature di  $300 \div 400$  °C, oppure combinando particolari trattamenti elettrochimici superficiali e riscaldamento più moderato.

Nella tecnica degli ultravuoti non è possibile pertanto usare sostanze organiche in quanto esse generalmente hanno tensioni di vapore elevato ed inoltre non sopportano temperature così alte.

Le normali guarnizioni di neoprene sono sostituite da guarnizioni metalliche di oro, rame, alluminio, etc.

Nei nostri Laboratori già da alcuni anni

sono allo studio le tecniche relative all'ultravacuo; un primo concreto risultato di questo lavoro è stato ottenuto con la *ciambella* di AdA [7-9], nella quale si è raggiunta una pressione residua di circa  $5 \times 10^{-10}$  tor.

Per la realizzazione della *ciambella* per un anello di maggiori dimensioni, parti-

L'analisi della composizione del gas residuo in un recipiente a pressione di  $10^{-8} \div 10^{-9}$  tor viene effettuata per mezzo di un particolare tipo di spettrometro di massa, l'omegatrone, basato sul principio del ciclotrone; l'esemplare rappresentato in Fig. 10 è stato realizzato nei nostri Laboratori.

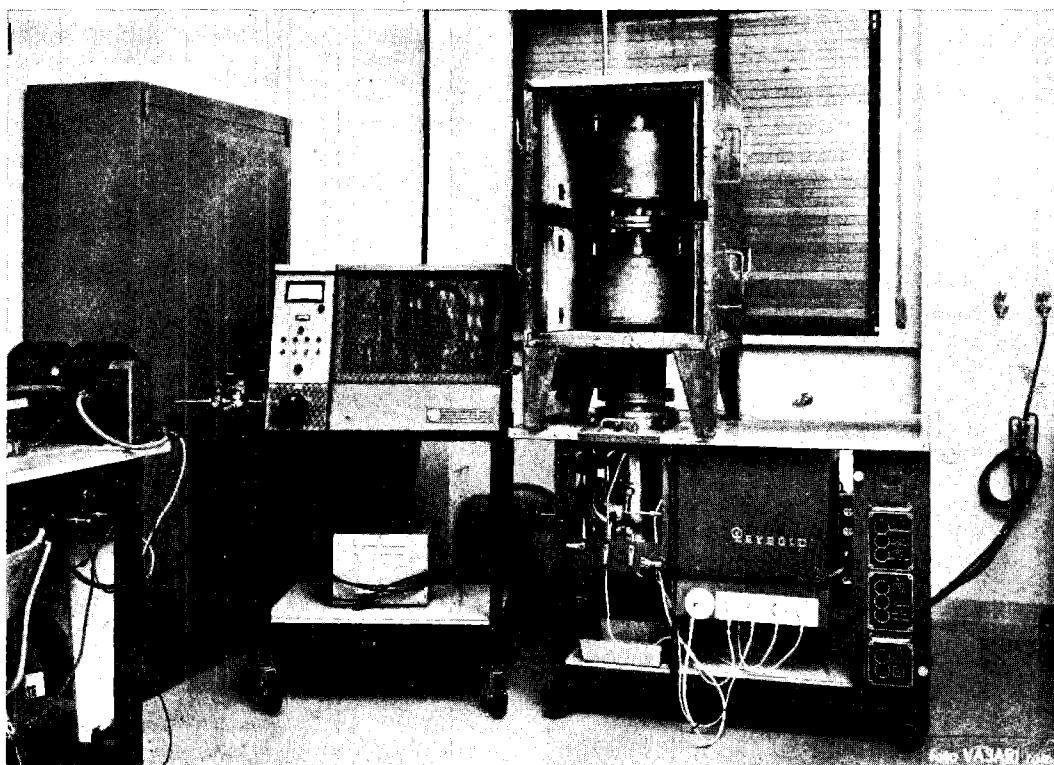


Fig. 9 - Banco da vuoto per prove.

colare importanza assume la soluzione di particolari problemi, quali, ad esempio, l'ottenere delle superficie con basse velocità di degassamento senza dover ricorrere a riscaldamenti a temperature superiori a  $150 \div 200$  °C.

Il laboratorio dispone di un banco per ultravacuo (vuoto limite  $\simeq 4 \times 10^{-10}$  tor) con pompa a diffusione ad olio e due trappole ad aria liquida, di forma opportuna, in cascata (Fig. 9); esso viene utilizzato per le varie prove.

L'impianto di vuoto per l'anello da 750 MeV prevede l'uso di 16 pompe al titanio da 400 l/s ciascuna.

L'uso delle pompe al titanio è particolarmente consigliabile, nel nostro caso, perché, trattandosi di un sistema chiuso, non vi è pericolo di rientro d'aria a causa di false manovre o di mancanza di energia sulla linea di alimentazione.

Date le dimensioni del sistema, si prevede che, in caso di rientro d'aria, occorreranno alcuni giorni (da tre a sette) per

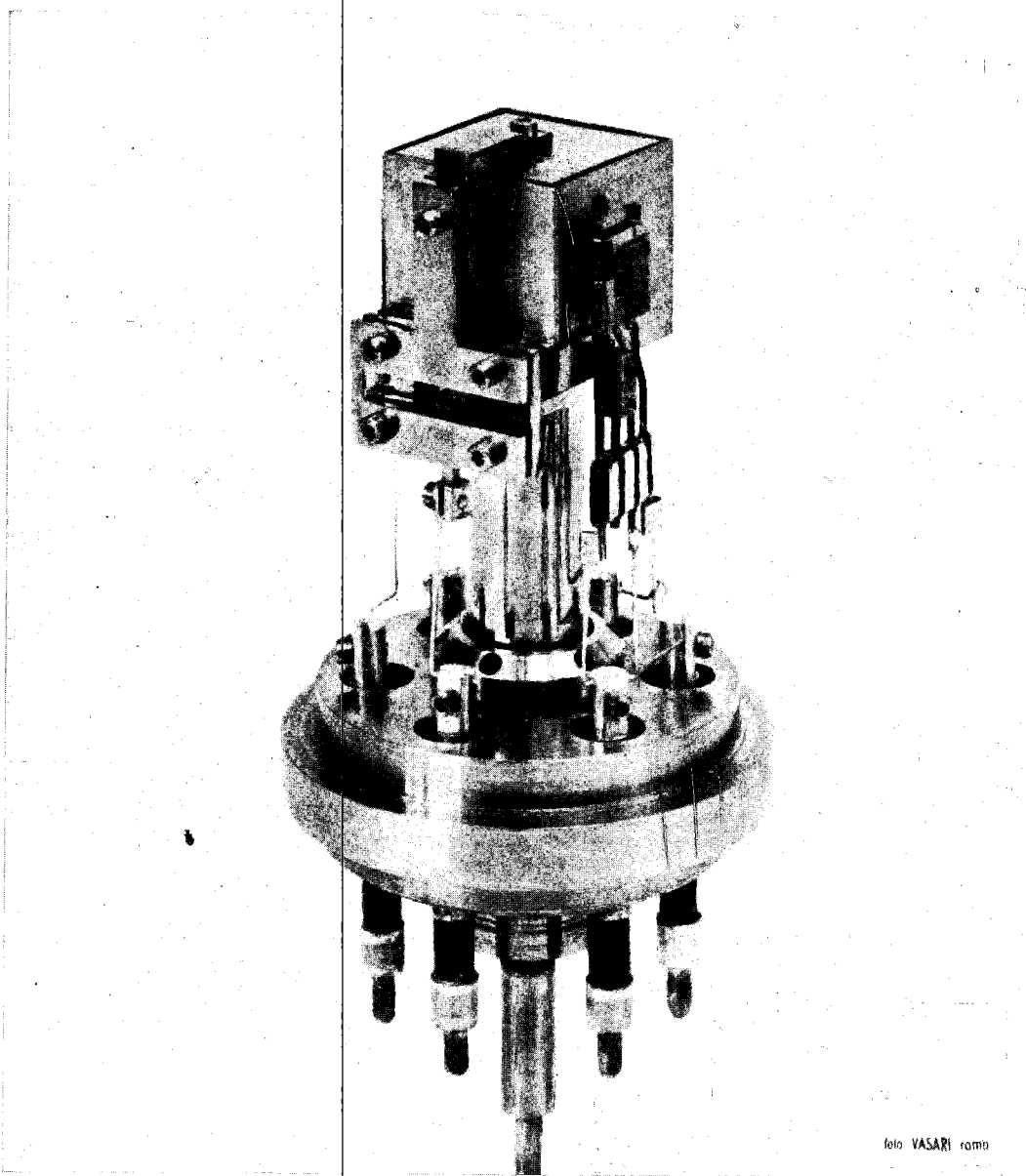


foto VASARI roma

FIG. 10 - Omegatrone.

riottenere un vuoto intorno a  $10^{-9}$  tor; è quindi assai importante premunirsi contro rientri d'aria accidentali.

Per la prevuotatura e degassamento saranno invece usate, probabilmente, delle pompe molecolari (tipo Pfeiffer), oppure delle pompe convenzionali a diffusione

con trappole ad aria liquida; terminata la prevuotatura queste pompe verranno escluse per mezzo di opportune valvole (cfr. Fig. 11 e 12) dal sistema di vuoto.

Va qui ricordato che un sistema di grandi dimensioni, in cui si è raggiunta

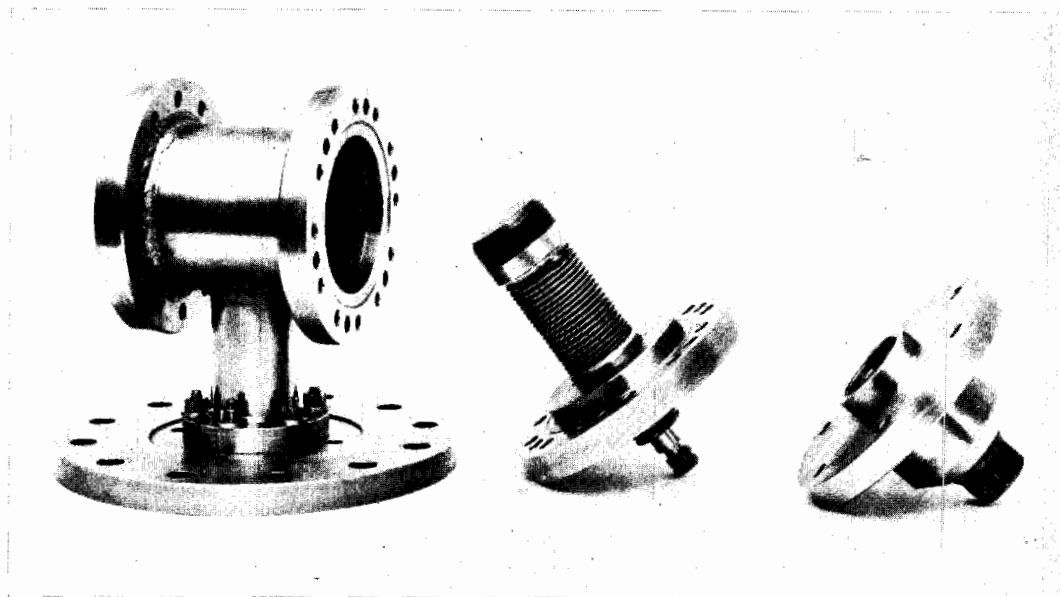


Fig. 11 - Valvola per ultravacuo.

una pressione minima di  $2 \times 10^{-10}$  tor, è già stato realizzato negli Stati Uniti per la macchina più recente della serie Stellarator, usata per le ricerche sulla fusione nucleare [27]; in questo caso l'impianto di vuoto è costituito da pompe a diffusione di olio convenzionali, sormontate da speciali trappole ad aria liquida.

#### 7 - L'impianto a RF.

L'energia media perduta in un giro da ogni particella nell'anello considerato, all'energia di 750 MeV è pari a circa 11,5 kV e questa energia deve essere rifornita dalle cavità acceleratrici. Per le ragioni cui si è già accennato nel par. 5, le cavità a RF devono però essere in grado di fornire alle particelle una energia molto maggiore; con la struttura magnetica in esame la tensione totale che deve poter essere fornita dalle cavità acceleratrici è di circa 25 kV. La frequenza della tensione acceleratrice, che è stata scelta pari alla seconda armonica della frequenza di rivoluzione del fascio, risulta di 12 MHz.

Le cavità risonanti e gli impianti di alimentazione a radiofrequenza dovranno essere progettati ed eseguiti con particolare cura poiché ad essi si richiede un funzionamento continuo, senza alcuna interruzione, sia pur breve, per decine di ore.

Se infatti venisse a mancare la tensione acceleratrice anche per un tempo dell'ordine della decina di micro-secondi il fa-

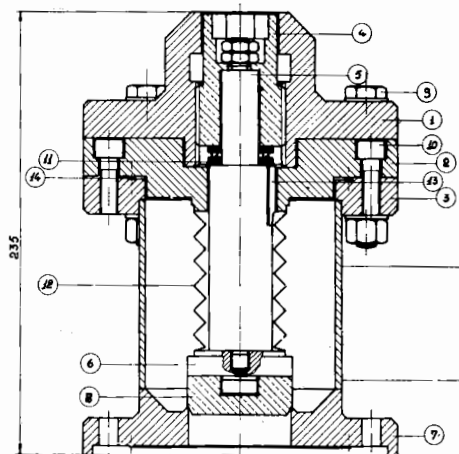


Fig. 12 - Valvola per ultravacuo: disegno costruttivo della valvola rappresentata in Fig. 11.

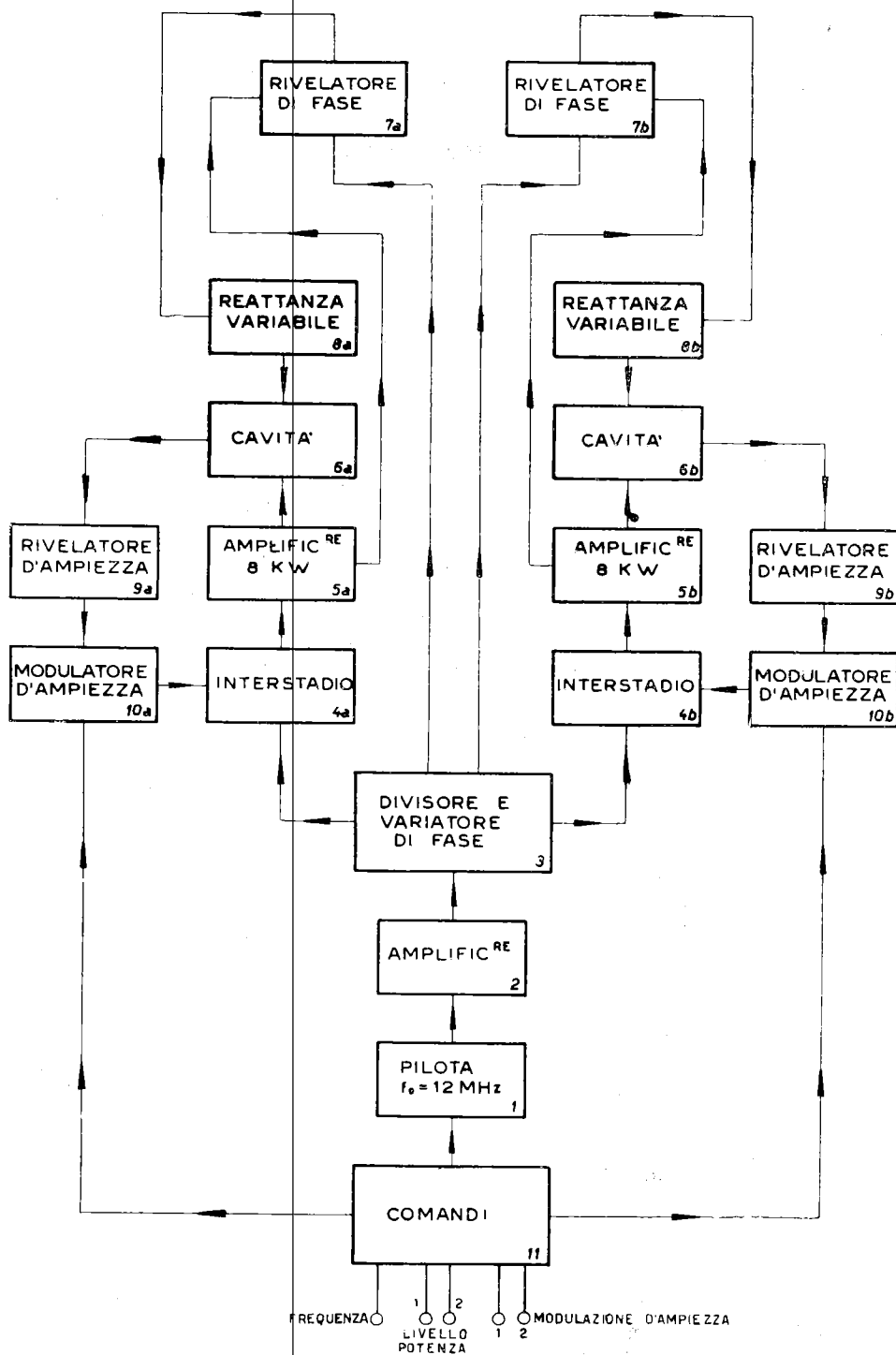


FIG. 13 - Schema a blocchi dell'impianto a radiofrequenza.



scio accumulato verrebbe completamente perduto. Siccome il tempo di accumulazione è dell'ordine di un'ora, ogni interruzione della tensione acceleratrice pro-

In conseguenza di quanto detto (e cioè per rendere minima la probabilità di assenza totale della tensione acceleratrice) il progetto prevede due cavità accelera-

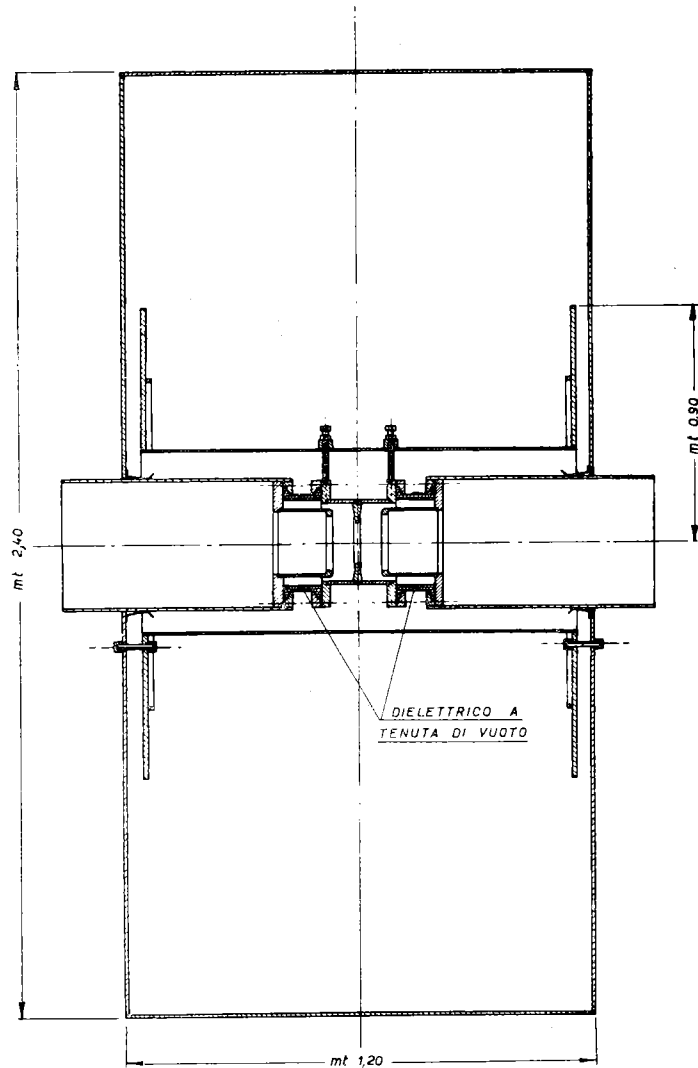


FIG. 14 - Cavità acceleratrice a 12 MHz.

voca un tempo morto di questo ordine di grandezza.

Questa considerazione, che vale per tutti gli impianti relativi ad un anello di accumulazione, impone soluzioni particolari nella realizzazione dell'impianto a radiofrequenza.

trici ciascuna delle quali è capace di fornire una tensione di 20 kV ed è alimentata da un'apposita catena amplificatrice; entrambe le catene a radiofrequenza vengono alimentate da uno stesso pilota.

Le soluzioni adottate sia per le cavità che per gli amplificatori tengono

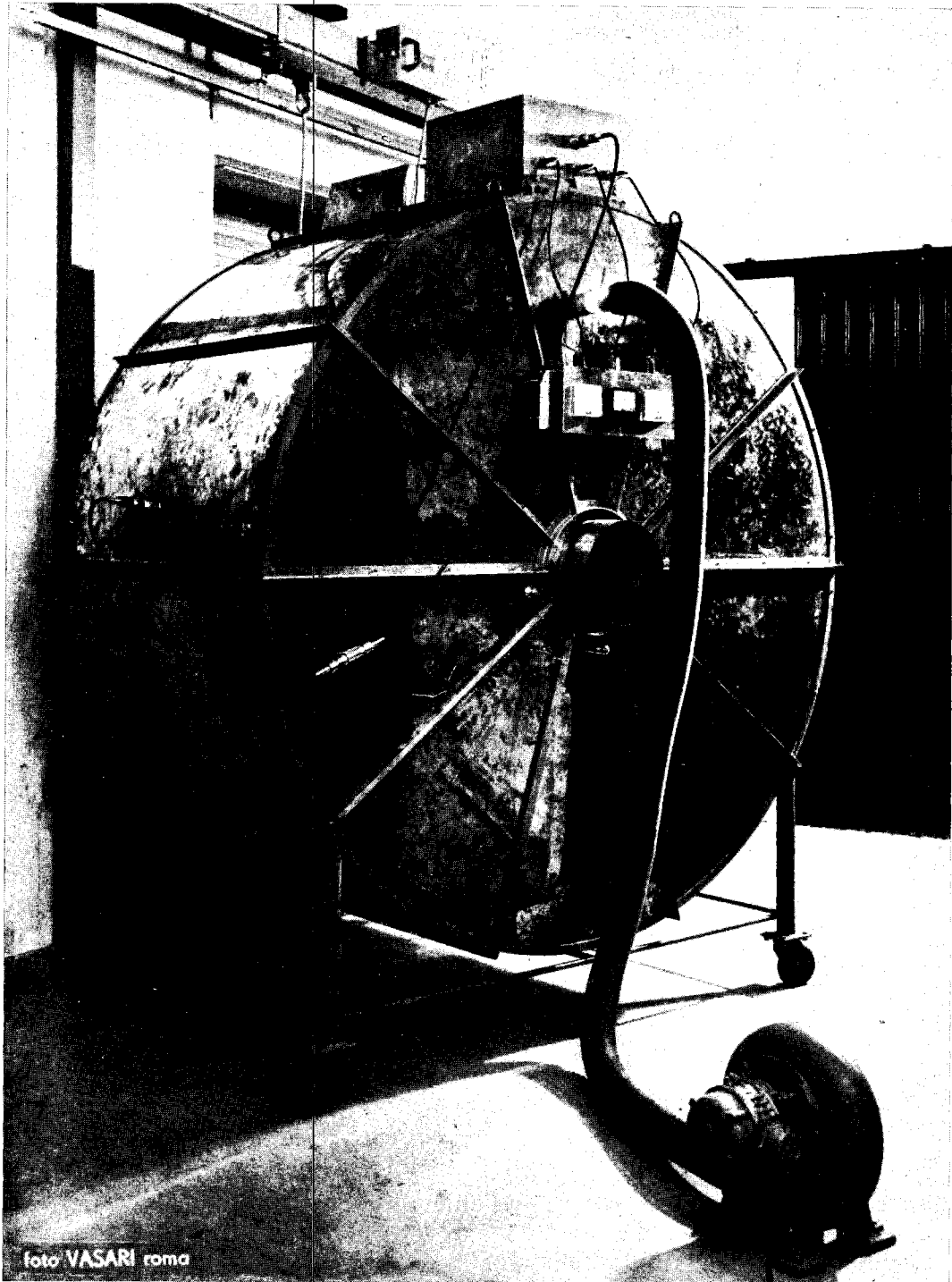


FIG. 15 - Modello di prova di cavità acceleratrice.

conto dei particolari problemi posti dalle elevate intensità dei fasci circolanti.

Nella Fig. 13 è dato lo schema a blocchi dell'impianto.

Poiché a 12 MHz le dimensioni meccaniche delle cavità acceleratrici accordate su questa frequenza sono notevoli (il diametro risulta superiore a due metri) le condizioni imposte all'impianto del del vuoto diventerebbero proibitive qualora le cavità stesse dovessero funzionare completamente sotto vuoto.

Seguendo quindi una soluzione studiata nel citato impianto dello stellator [27] e già adottata nell'anello di Stanford, le cavità acceleratrici, che hanno la forma riprodotta in Fig. 14, saranno per la maggior parte in aria. Nella parte centrale di ogni cavità un tubo di ceramica a base di allumina, connesso alla ciambella, costituirà la tenuta di vuoto.

Sono attualmente allo studio i problemi connessi con questo tipo di soluzione servendosi di una cavità costruita appositamente (Fig. 15) in modo tale da poter variare le caratteristiche della parte sotto vuoto con notevole facilità.

## 8 - Conclusione.

Nelle pagine che precedono abbiamo esaminato alcuni dei principali problemi che si pongono nella costruzione di un anello di accumulazione per elettroni e positroni.

L'entrare in maggiori dettagli esula dallo scopo del presente lavoro, e rimandiamo, chi a ciò fosse interessato, agli articoli e rapporti interni citati nella bibliografia; d'altra parte, non essendo terminata la fase di progettazione, molti elementi non sono ancora definitivamente decisi, e quindi una presentazione più completa non sarebbe stata neppure giustificata.

Il nostro programma prevede il completamento dell'anello da 750 MeV entro tre anni, e cioè entro l'estate del 1965; la costruzione dell'anello da 1500 MeV inizierà dopo che quello da 750 MeV avrà fornito le necessarie informazioni sul funzionamento di questo tipo nuovo di macchina acceleratrice, per terminare, presumibilmente, entro i due o tre anni successivi.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] G. K. O'NEILL: « Storage rings for electrons and protons », in *Proceedings International Conference on High Energy Accelerators and Instrumentation*, p. 125 (Genève, CERN, 1959).
- [2] R. GATTO: « On the experimental possibilities with colliding beams of electrons and positrons », in *Proceedings of the Aix-en-Provence International Conference on Elementary Particles*, vol. 1, p. 487 (Saclay, CEN, 1961).
- [3] N. CABIBBO & R. GATTO: « Pion form factor from possible high-energy electron-positron experiments », in *Phys. Rev. Letters*, **4**, 313 (1960).
- [4] N. CABIBBO & R. GATTO: « Theoretical discussion of possible experiments with electron-positron colliding beams », in *Nuovo Cimento*, **20**, 185 (1961).
- [5] N. CABIBBO & R. GATTO: « Electron-positron colliding beam experiments », in *Phys. Rev.*, **124**, 1577 (1961).
- [6] R. GATTO: « Possibilità sperimentali con fasci incrociati di elettroni e positroni », in *Ric. sci.*, **32** (I), 161-172 (1962).
- [7] C. BERNARDINI et al.: « L'anello di accumulazione AdA per elettroni e positroni da 250 MeV », in *Ric. sci.*, **32** (I), 137-142 (1962).
- [8] C. BERNARDINI et al.: « The Frascati storage ring », in *Nuovo Cimento*, **18**, 1293 (1961).
- [9] C. BERNARDINI et al.: « A 250 MeV  $e^+ e^-$  storage ring: AdA », Comunicazione alla Conferenza Internazionale sugli Acceleratori per Alte Energie, Brookhaven (1961), in *Nuovo Cimento*, **23**, 202 (1962).
- [10] F. AMMAN et al.: « Un anello di accumulazione per elettroni e positroni (Adone) », in *Laboratori Nazionali di Frascati, Rapporto LNF*, 61/5 (26 gennaio 1961).

- [11] F. AMMAN *et al.*: «Proposta per la realizzazione di un anello di accumulazione per elettroni e positroni da 1,5 GeV», in *Laboratori Nazionali di Frascati, Rapporto LNF*, 61/65 (7 dicembre 1961).
- [12] F. AMMAN & D. RITSON: «Space charge effects in  $e^-e^-$  and  $e^+e^-$  colliding or crossing beam rings», Comunicazione alla Conferenza Internazionale sugli Acceleratori per Alte Energie, Brookhaven (1961), in *Laboratori Nazionali di Frascati, Rapporto LNF*, 61/38 (24 luglio 1961).
- [13] M. BASSETTI: «Calcoli numerici sugli effetti di carica spaziale in un anello di accumulazione per elettroni e positroni», in *Laboratori Nazionali di Frascati, Rapporto LNF*, 62/35 (5 maggio 1962).
- [14] L. SMITH: «Linear accelerators», in *Handbuch der Physik*, vol. 44, p. 341 (Berlin, Springer, 1959).
- [15] L. KATZ & K. H. LOKAN: «The generation of positrons in a thick target bombarded by fast electrons», in *Nucl. Instr. and Meth.*, **11**, 7 (1961).
- [16] C. TZARA: «Rendement en positrons et en photons d'annihilation d'accélérateur lineaire d'electrons», in *Rapport SPNME*, n. 6 (1961).
- [17] W. C. BARBER *et al.*: «An experiment on the limits of quantum electrodynamics», in *Stanford University Report HELP*, 170 (1959).
- [18] B. KUIPER & G. PLASS: «On the fast extraction of particles from a 25 GeV protonsynchrotron», in *CERN Report*, 59-30 (24 agosto 1959).
- [19] E. D. COURANT, M. S. LIVIGSTON & H. S. SNYDER: «The strong focusing synchrotron. An new high energy accelerators», in *Phys. Rev.*, **88**, 1190 (1952).
- [20] E. PERSICO: «Lezioni sulle macchine acceleratrici», p. 96, (Roma, CNRN, 1959).
- [21] C. PELLEGRINI: «A calculations of radiation effects on electron oscillations in a circular accelerator», in *Nuovo Cimento*, Suppl. **22**, 603 (1961).
- [22] R. W. ROBINSON: «Radiation effects in circular electron accelerators», in *Phys. Rev.*, **111**, 373 (1958).
- [23] YU. F. ORLOV, E. K. TARASOV & S. A. KHEJFETS: «Dempirovanie kolebanij chastits v elektronnom sinkhrotrone s zhestkoj fokusirovkoj», in *Pribory i Tekh. Eksper.*, **1**, 17 (1959).
- [24] A. A. KOLOMENSKI & A. N. LEBEDEV: «The effect of radiation of the motion of relativistic electrons in a synchrotron», in *Proceedings CERN Symposium on High Energy Accelerators and Pion Physics*, vol. 1, p. 447 (Genève, CERN, 1956).
- [25] M. BASSETTI, R. EVANGELISTI & C. PELLEGRINI: «Determinazione dei diversi parametri di una struttura magnetica 'smorzata'», in *Laboratori Nazionali di Frascati, Rapporto LNF*, 62/17 (8 marzo 1962).
- [26] L. MANGO: «Studio dei parametri di una struttura a funzioni separate con foccheggiamento forte», in *Laboratori Nazionali di Frascati, Rapporto LNF*, 62/34 (3 maggio 1962).
- [27] K. DREYER & J. T. MARK: «The ultra-high-vacuum system for the C-stellarator», in *RCA Review*, **21**, 508 (1960).