

Laboratori Nazionali di Frascati

LNF-61/79 (1961)

M. Puglisi, G. Sacerdoti: L'ELETTROSINCROTRONE DI FRASCATI.

Estratto da: Alta Frequenza, 30, 755 (1961)

L'ELETTROSINCROTRONE DI FRASCATI

M. PUGLISI E G. SACERDOTI (*)

Viene descritto con un certo dettaglio l'elettrosincrotrone di Frascati. Si espongono i principi di funzionamento della macchina in generale e le ragioni principali per le soluzioni tecniche adottate.

Nella descrizione degli impianti ci si è soffermati particolarmente sul magnete e sulla radiofrequenza.

INTRODUZIONE.

Il presente articolo riferisce in breve alcune delle caratteristiche dell'elettrosincrotrone di Frascati e fornisce una generale descrizione del funzionamento di questa macchina.

La descrizione completa e particolareggiata di questo Elettrosincrotrone comparirà tra breve sulla rivista ufficiale della Fisica italiana a nome di tutti coloro che hanno collaborato alla costruzione della macchina.

Con riferimento all'articolo sul Nuovo Cimento (XI, n. 2, 311) con il quale fu annunciato il funzionamento della macchina all'energia di 1000 MeV, ci è grato ricordare qui i nomi delle persone che hanno collaborato a questa realizzazione sotto la direzione del prof. Giorgio Salvini:

M. Ageno, A. Alberigi, F. Amman, C. Bernardini, U. Bizzarri, G. Bologna, G. Corazza, G. Diambri, G. Ghigo, A. Massarotti, G. P. Murtas, M. Puglisi, E. Persico, I. F. Quercia, R. Querzoli, G. Sacerdoti, G. Salvini, G. Sanna, P. G. Sona, R. Toschi, A. Turrin.

PREMESSA.

Le ricerche di Fisica fondamentale negli ultimi decenni sono diventate molto onerose sia per il numero di persone impegnate sia per l'importanza ed il costo delle apparecchiature necessarie.

I laboratori di Frascati sono stati appunto concepiti per queste ricerche e sono sorti intorno al Sincrotrone per elettroni da 1000 MeV che è lo strumento più importante che ivi si trova.

Un elettrosincrotrone è una macchina acceleratrice: e cioè ha lo scopo di accelerare particelle cariche (nel nostro caso elettroni) fino ad energia elevata.

In altri termini fornisce gradualmente energia alle particelle che alla fine del ciclo di accelerazione si trovano ad avere la stessa energia che avrebbero ricevuto se fossero state sottoposte ad elevatissime differenze di potenziale.

Le particelle accelerate solitamente vengono fatte urtare contro un bersaglio di materiale pesante (per es.: può essere un filo di tungsteno) e si ottiene così un fascio di radiazioni γ con uno spettro di energia compreso tra lo zero ed un valore eguale alla energia massima degli elettroni.

Il fascio di radiazioni che esce dalla macchina, dopo una forte collimazione, viene usato per esperienze di fisica. Sarebbe utile usare il fascio di elettroni diretta-

mente per le esperienze, ma l'estrazione di un fascio collimato di particelle cariche dal campo magnetico del Sincrotrone è un problema che presenta forti difficoltà tecniche e anche quando si riesca ad estrarre il fascio ciò va a scapito della sua intensità.

I parametri funzionali che caratterizzano il Sincrotrone di Frascati sono:

tipo di particella accelerata: elettroni;
energia massima: 1000 MeV (1);
numero di impulsi al secondo: 20;
numero di particelle per impulso: 10^9 ;
durata massima del fascio γ : 3 millisecondi.

Tra i sincrotroni per elettroni, esistenti attualmente nel mondo, solo altri due danno prestazioni paragonabili a quelle del Sincrotrone di Frascati.

L'Elettrosincrotrone di Frascati può considerarsi quindi una macchina di prim'ordine e rappresenta un vanto per i tecnici e per l'industria italiana poichè è una complessa opera di ingegneria interamente progettata e costruita in Italia.

PRINCIPI DI FUNZIONAMENTO DI UN ELETTROSINCROTRONE.

Gli elettroni da accelerare sono emessi da un filamento incandescente di tungsteno. Detto filamento con il complesso di griglie ed elettrodi adatto per ottenere un fascio collimato costituisce la sorgente degli elettroni.

Questa sorgente si trova entro l'elettrodo ad alta tensione di un preacceleratore (2) elettrostatico (Van de Graaff o Cockroft and Walton) mantenuto ad una tensione negativa pari a qualche milione di volt rispetto a massa. La differenza di potenziale generata nella macchina viene distribuita opportunamente mediante setti metallici lungo un tubo isolante mantenuto sotto vuoto spinto.

Gli elettroni emessi dalla sorgente attraversano questo tubo ed acquistano un'energia pari alla d.d.p. applicata tra la sorgente e massa.

L'energia cinetica E della particella è data dalla formula:

$$E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - m_0 c^2$$

ove:

m_0 = massa della particella
 c = velocità della luce
 v = velocità della particella.

Per un elettrone vale la tabella I.

Un elettrone quindi alla fine della preaccelerazione ha una velocità già molto prossima a quella della luce. Nel caso dell'elettrosincrotrone di Frascati le particelle escono dal Van de Graaff con un'energia pari a 2,5 MeV cinetici.

Dott. ing. M. PUGLISI, Prof. G. SACERDOTI, del Comitato Naz. Energia Nucleare, laboratori di Frascati.

(1) Il MeV è l'unità di energia usata in fisica nucleare ed è pari all'energia che una particella, con carica elettrica uguale a quella dell'elettrone, acquista attraversando una d.d.p. pari a un milione di Volt.

(2) E. PERSICO: *Macchine acceleratrice*. - 1959, Corso di perfezionamento in ingegneria nucleare, Roma.

TABELLA I

CORRISPONDENZA TRA ENERGIA CINETICA E VELOCITÀ PER UN ELETTRONE.

| E (MeV) | v/c |
|---------|--------|
| 0,1 | 0,8629 |
| 0,5 | 0,8629 |
| 1 | 0,9411 |
| 2 | 0,9791 |
| 5 | 0,9957 |
| 10 | 0,9988 |
| 100 | 1,0000 |
| 1000 | 1,0000 |

E perciò alla iniezione gli elettroni vengono ad avere una velocità che differisce meno del 2 % da quella della luce.

All'uscita del preacceleratore le particelle passano attraverso un canale ottico costituito da lenti quadrupolari per poter avere all'ingresso del Sincrotrone un fascio delle caratteristiche ottiche richieste.

Tra il termine del canale ottico ed il Sincrotrone vero e proprio vi è un deflettore elettrostatico che serve ad iniettare con opportuna direzione il fascio nella macchina (fig. 1).

Una volta iniettate le particelle cominciano a muoversi entro il campo magnetico che ha funzioni di *guida* e *foccheggiamento* ed inizia così la fase più importante dell'accelerazione alla fine della quale raggiungeranno l'energia massima (vedi appendice).

Al momento nel quale gli elettroni entrano nella camera a vuoto posta tra i poli del magnete, il campo magnetico è crescente e perciò l'orbita principale tende a restringersi istante per istante. Segue quindi che una particella iniettata in condizioni opportune percorre una spirale mentre le particelle iniettate in condizioni simili, ma non eguali a quelle della particella detta, percorreranno orbite oscillanti intorno a questa spirale.

L'effetto della spiralizzazione è essenziale alla cattura delle particelle perchè evita che queste vengano perdute per urti contro il deflettore nei giri successivi.

La spiralizzazione può variare a seconda della derivata

disce che le particelle continuino a spiralizzare andando a battere contro le pareti interne della ciambella.

Regolando la spiralizzazione e le caratteristiche della tensione acceleratrice, si riesce a catturare fino a circa il 2 % delle particelle iniettate.

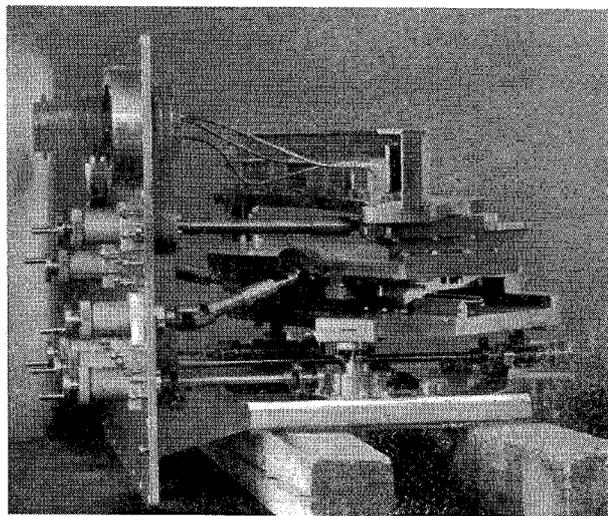


Fig. 1. — Deflettore elettrostatico

La frequenza della tensione acceleratrice è modulata in funzione del campo magnetico in modo da essere sempre sincrona con la quarta armonica del periodo di rivoluzione delle particelle. La tensione acceleratrice è pure modulata in ampiezza e le particelle vengono così accelerate in qualche centinaia di migliaia di giri fino a raggiungere l'energia massima.

Dopo l'utilizzazione del fascio la macchina si riporta nelle condizioni iniziali e il ciclo ricomincia.

IL MAGNETE (3).

Nella fig. 2 è riportata la fotografia del magnete e in fig. 3 sono riportate la sezione e la pianta del magnete.

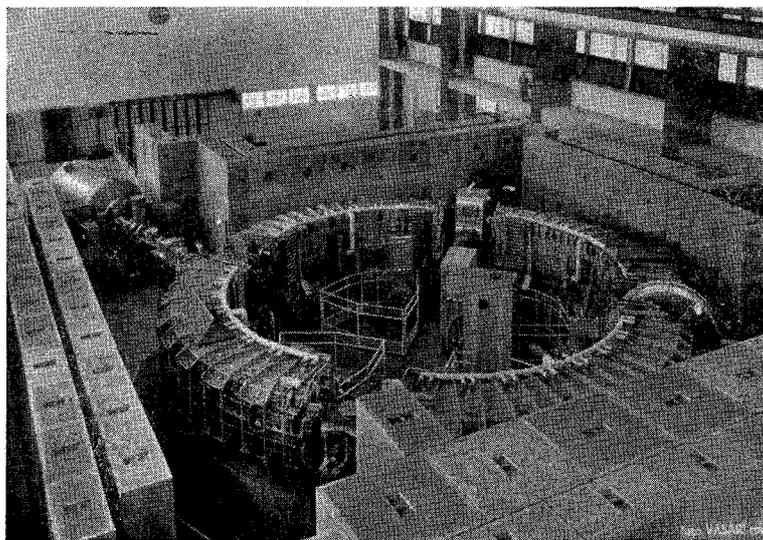


Fig. 2. — Fotografia del magnete.

temporale del campo. Valori compresi tra qualche decimo e qualche millimetro per giro sono quelli che generalmente risultano più convenienti. Dopo l'iniezione si accende la radiofrequenza. Questa, cedendo energia, impe-

(3) G. SACERDOTI: Dimensionamento del C del sincrotrone. - M-48 Lab. Naz. SACERDOTI, R. TOSCHI: Informazioni tecniche sul magnete del Sincrotrone e sua alimentazione. - M/54; Lab. Naz. di Frascati del C.N.E.N.

Questo è costituito da 4 quadranti ciascuno formato da 16 blocchi di lamierino da 0,3 mm di spessore sagomati a C. I lamierini isolati fra di loro mediante fosfizzazione sono incollati con araldite.

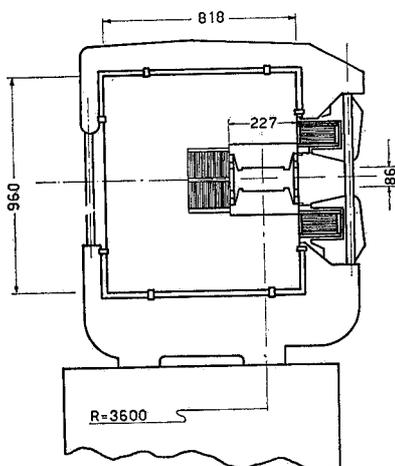


Fig. 3 a). — Sez. magnete.

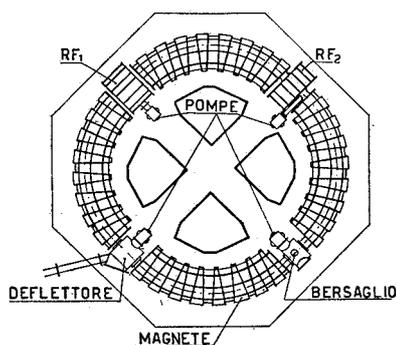


Fig. 3 b). — Pianta magnete.

L'intraferro tra i poli è più largo che alto: infatti sul piano radiale si hanno oscillazioni sia di betatrone sia di sincrotrone mentre in direzione assiale si hanno solo le oscillazioni di betatrone (vedi appendice). Le dimensioni del traferro in questione sono di $0,2 \times 0,08$ m.

Il raggio dei quadranti è di 3,60 m sul centro del traferro. La distanza tra i quadranti è di 1,206 m; l'indice di campo n è uguale a $0,61 \pm 0,02$.

Nella costruzione delle bobine di alimentazione si è dovuto ricorrere a conduttori trasposti invece che a barre di rame pieno onde evitare che correnti parassite perturbino il campo magnetico nella fase più delicata di tutto il ciclo di accelerazione e cioè all'iniezione: in tale istante il campo di iniezione è solo $2,7 \cdot 10^{-3}$ Wb/m² e quindi la forma del campo è molto sensibile alle perturbazioni dovute alle correnti parassite nel rame e nel ferro e alla presenza di altri magneti nelle vicinanze. Difatti con misure magnetiche su modello, ove l'avvolgimento era costituito da barre di rame pieno si sono misurati i forti effetti delle correnti parassite che avrebbero impedito il buon funzionamento della macchina.

Nel magnete si è cercato di rendere il campo magnetico estremamente uniforme lungo l'azimut.

Per questo si sono curate al massimo le precisioni geometriche e magnetiche della costruzione. Si sono per esempio mescolati i lamierini nella fabbricazione dei blocchi per evitare che piccole variazioni nella laminazione della partita si ripercuotessero sulla uniformità del campo. Dei vari blocchi è stata preparata dopo le misure una

« carta di identità magnetica » ed in base a questa è stato deciso l'ordine di sistemazione dei blocchi lungo l'azimut.

Le misure magnetiche per il mescolamento dei blocchi, effettuate con apparecchiature costruite presso i laboratori, sono state misure di carattere comparativo rispetto ad un blocco campione e precisamente (1):

1) differenza di campo magnetico tra i blocchi alla corrente corrispondente a 27×10^{-4} Wb/m² con eccitazione in corrente alternata;

2) differenza di campo magnetico tra i blocchi a 27×10^{-4} Wb/m² con eccitazione in corrente continua;

3) differenza di campo magnetico presso la saturazione.

Le misure sono servite a mettere in luce le differenze delle proprietà del ferro a campi bassissimi ed alla saturazione.

Alcuni risultati delle misure magnetiche effettuate sono riportati in fig. 4.

Le precisioni raggiunte nella geometria sono state $\pm 0,1$ mm nel piano di appoggio dei poli in un quadrante e

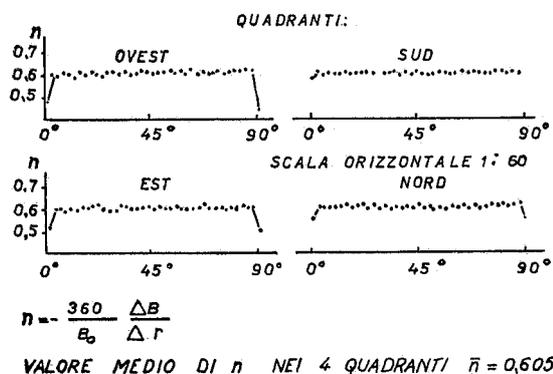


Fig. 4. — Misure azimutali di n a 500 gauss c.c. nei 4 quadranti.

$\pm 0,2$ mm su tutto l'anello della macchina. L'uniformità magnetica invece è migliore dell'1% all'iniezione e molto maggiore a campi superiori.

Nello spazio tra la ciambella e le espansioni polari sono sistemati due tappeti di fili per le piccole correzioni del campo magnetico all'iniezione. La corrente di questi fili è comandata da particolari circuiti elettronici. Inoltre i singoli blocchi di lamierini hanno avvolgimenti propri per aumentare la uniformità azimutale del magnete.

Il ciclo di eccitazione del magnete è riportata in fig. 5.

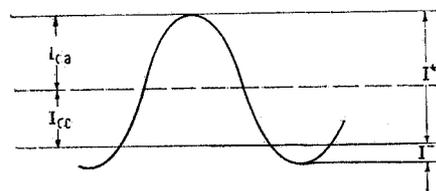


Fig. 5. — Eccitazione magnete.

Le alimentazioni necessarie sono:

3 000 A c.c. $V = 30$ volt

2 100 A c.a. $V = 5000$ volt

Le perdite in corrente continua sono dell'ordine dei 100 kW e le perdite in corrente alternata sono di 200 kW. Il peso del magnete è di 100 tonnellate.

(1) Le misure sono state eseguite sotto la responsabilità del Prof. Diambriani del Lab. Naz. di Frascati del C.N.E.N.

CIRCUITO DI ALIMENTAZIONE.

Per ottenere l'eccitazione del magnete si è scelto il circuito dato in fig. 6.

I condensatori formano con l'induttanza del magnete un circuito risonante: il generatore Gca supplisce alle perdite in corrente alternata del circuito.

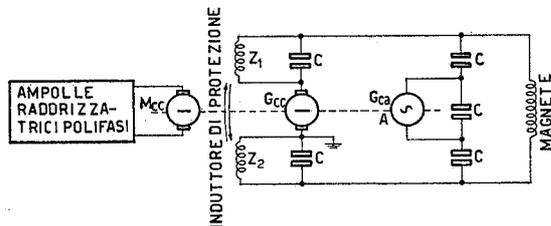


Fig. 6. — Circuito eccitazione magnete.

I circuiti risonanti in serie al generatore in corrente continua servono ad evitare che questo generatore costituisca un corto circuito per la tensione alternata ai capi del magnete.

La frequenza ed il valore della corrente alternata sono stabilizzati a meglio dell'1/100. La corrente continua del magnete è pure stabilizzata all'1/100. La differenza tra i valori di picco della corrente alternata e il valore della corrente continua è pure stabilizzata a meglio dell'1%.

La corrente minima nel magnete è molto importante per il buon funzionamento del Sincrotrone perchè le perturbazioni dovute al campo magnetico residuo (corrette in parte con le bobine di correzione) varierebbero molto al variare di questa grandezza e così pure la derivata temporale dell'induzione dB/dt all'iniezione che invece è bene non si discosti troppo dal valore prescelto.

L'energia magnetica massima del magnete è di $2,65 \times 10^6$ Joule. La potenza del banco di condensatori a 50 p/s è di 10560 kVA e la capacità è di 3420 pF.

Nel circuito definitivo si è dovuto sistemare un piccolo induttore in serie al generatore Gca per evitare i fenomeni di sovracorrente del circuito che occorrevano a piena eccitazione. Questi fenomeni erano dovuti probabilmente all'effetto combinato della variazione dell'induttanza a causa della saturazione nel magnete e all'accoppiamento magnetico tra le bobine dell'induttore che fa parte del circuito risonante sul ramo c.c.

IMPIANTO A RADIO FREQUENZA.

La tensione acceleratrice cui è sottoposto il fascio circolante nella macchina deve ad ogni giro fornire l'energia necessaria a mantenere le particelle in orbita. Questa energia è data dalla somma di due termini; il primo corrisponde all'energia che deve acquistare la particella affinché l'aumento del campo magnetico non faccia contrarre il raggio dell'orbita; il secondo serve a compensare l'energia irradiata dalle particelle stesse.

L'energia irradiata per giro aumenta con la quarta potenza dell'energia della particella stessa e, nel caso della macchina di Frascati, quando gli elettroni raggiungono 100 MeV vale 27 KeV mentre la massima energia richiesta dalla variazione di campo è dell'ordine di circa 6000 eV.

La frequenza della tensione eccitatrice deve variare, come è stato accennato, in accordo all'aumento di velocità delle particelle; nel nostro caso da 43 a 43,7 MHz.

Le tolleranze sull'ampiezza della tensione sono abbastanza ampie (principio della stabilità di fase) mentre quelle sulla frequenza sono dell'ordine dell'1/100.

Poichè il fascio di elettroni raggiunge l'energia finale attraversando un gran numero di volte il dispositivo acceleratore, segue che questo deve generare un campo elettrico non conservativo così che ad ogni giro la circuitazione possa essere diversa da zero.

Il modo migliore per risolvere il problema è quello di far interagire il fascio di elettroni con il campo di un risonatore a cavità.

Segue quindi che il problema dell'impianto di radiofrequenza è quello di eccitare le cavità acceleratrici nel modo voluto.

Nella prima parte dell'accelerazione, e cioè fino a che il fascio ha energia inferiore ai 10 MeV la tensione acceleratrice totale risulta sempre inferiore a circa 10000 volt mentre l'incremento di velocità delle particelle è sensibile (è quindi necessaria la modulazione di frequenza). Nella seconda parte del ciclo, e cioè oltre i 10 MeV la tensione acceleratrice deve essere piuttosto elevata raggiungendo il suo valore massimo verso la fine del ciclo, mentre l'aumento di velocità delle particelle è piccolissimo, tanto da poter lavorare a frequenza costante. (L'aumento di energia si riflette sostanzialmente in un aumento di massa).

Da quanto detto risulta che il problema si può risolvere senza urtare contro gravi difficoltà ponendo lungo l'orbita del fascio due distinti risonatori alimentati da impianti di diverse caratteristiche per assolvere ai due compiti così diversi. Difatti l'esigenza di alte tensioni con larga banda passante male si concilierebbe con l'impiego di un solo risonatore ad alto fattore di merito. Pertanto l'impianto a radiofrequenza è stato diviso in due parti: la prima parte (RF_1) genera ed amplifica un segnale modulato in frequenza ed in ampiezza che serve ad alimentare la prima cavità risonante posta in una delle sezioni diritte della macchina.

La seconda parte (RF_2), destinata a lavorare a frequenza fissa, alimenta la seconda cavità risonante, posta in un'altra sezione diritta; che ha lo scopo di accelerare gli elettroni fino all'energia finale.

La scelta della quarta armonica è stata motivata principalmente da ragioni tecnologiche (ingombro meccanico dei risonatori, ecc.) ed anche da motivi teorici (vedi appendice).

In base alle indicazioni teoriche è stato deciso che la modulazione di ampiezza possa consentire alla tensione che si manifesta al gap della prima cavità di passare dal valore di 3000 volt, all'istante di iniezione, al valore di 7000 volt, alla fine del ciclo di funzionamento. Il tempo di salita alla accensione deve essere inferiore a 2 microsecondi.

La tensione massima che si deve sviluppare tra le armature della cavità RF_2 (a frequenza fissa) è molto più alta: il suo valore di cresta è stato fissato a 70 kV alla fine del ciclo di accelerazione (5).

Al termine dell'accelerazione modulando più o meno lentamente la tensione a radio frequenza si può ottenere che il fascio degli elettroni circolanti entro la macchina colpisca il bersaglio sfiorandolo successivamente in molti giri in modo che la durata del fascio γ prodotto possa essere regolata nel modo più consono alla sperimentazione in corso.

Risulta quindi che la modulazione di ampiezza alla fine del ciclo può essere molto critica e l'aggiustamento definitivo viene fatto caso per caso empiricamente.

a) Lo schema a blocchi.

Nella fig. 7 è riportato lo schema generale dell'impianto. I vari blocchi (contraddistinti con i numeri da 1 a 14) non rappresentano tutti, ovviamente, parti materialmente separabili dell'impianto ma stanno ad indicare quale sia il meccanismo di funzionamento di tutto l'insieme.

Il gruppo (1) rappresenta i circuiti dell'oscillatore pilota modulato in frequenza per mezzo di un tubo di reat-

(5) Questo valore è determinato dal fatto che quando le perdite per irraggiamento divengono elevate occorre tener conto e compensare gli effetti delle fluttuazioni quantistiche dell'irraggiamento stesso.

Il tempo durante il quale il tetrodo prefinale risulta acceso è compreso tra uno e due millisecondi per ogni ciclo e viene aggiustato empiricamente secondo le esigenze di funzionamento della macchina. Durante la fase di spegnimento del risonatore RF_1 l'impianto RF_2 viene acceso dal suo modulatore che a sua volta è comandato dal circuito principale di sincronizzazione.

Durante la modulazione di frequenza l'impedenza « vista » dalla valvola passa da valori molto bassi, circa $1\ 000\ \Omega$ all'iniezione a valori molto elevati quando la frequenza di eccitazione è uguale a quella di accordo del risonatore (circa $14\ 000\ \text{ohm}$; dovuti al fatto che la ciambella attraversando il risonatore ne abbassa fortemente il fattore di merito).

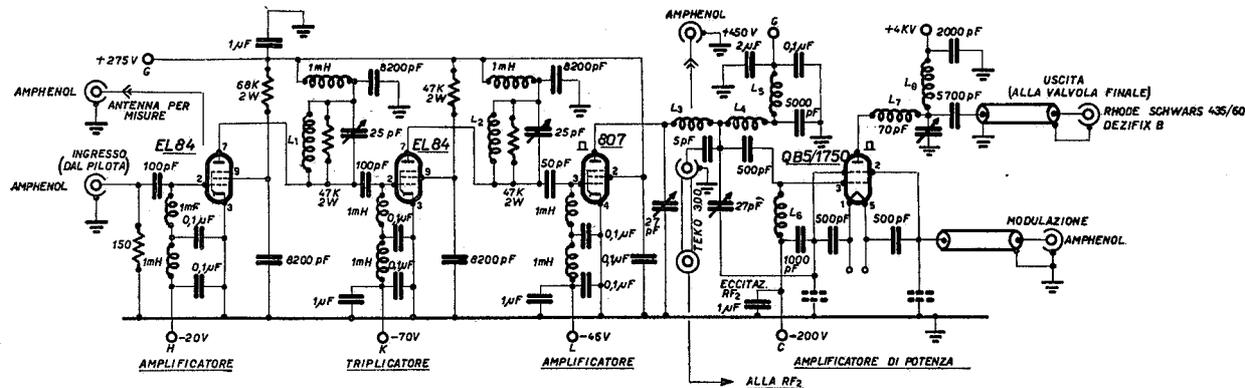


Fig. 9. — Catena amplificatrice radio frequenza.

c) Il gruppo « amplificatore cavità » RF_1 .

Poichè come si è già detto la cavità risonante RF_1 deve fornire una tensione modulata in frequenza oltre che in ampiezza, è stato lungamente studiato il problema dell'eccitazione del risonatore con frequenze differenti da quella di risonanza.

Specialmente in vista del fatto che la tensione deve passare dal valore zero a circa $3\ 000$ volt in meno di 2 microsecondi all'inizio del ciclo (cioè al momento del massimo disaccordo) e che proprio in questo periodo è necessario evitare oscillazioni nell'involuppo della tensione acceleratrice allo scopo di non perturbare la cattura delle particelle da parte della radiofrequenza, sono stati provati due sistemi di accordo continuo della cavità.

Si è tentato cioè di accordare dinamicamente la cavità risonante sulle varie frequenze di lavoro ricorrendo sia a condensatori a capacità variabile, per mezzo di una tensione di polarizzazione, sia ad induttanze variabili ottenute variando la permeabilità di nuclei di ferrite impiegati nella parte induttiva del risonatore e polarizzabili dall'esterno nel modo voluto.

Alla fine si è deciso di alimentare il risonatore collegando direttamente la placca della valvola di potenza con l'elettrodo centrale del risonatore stesso. In questo modo a causa della bassa impedenza di placca del tubo si riesce ad allargare la banda passante del risonatore senza ricorrere a complicati metodi di accordo continuo di delicato e non sufficientemente rapido funzionamento.

Il fatto di aver deciso di collegare direttamente la valvola finale al risonatore influenza notevolmente il progetto del risonatore stesso. Le varie esigenze vengono soddisfatte da un risonatore di grandi dimensioni, difatti così facendo le dimensioni meccaniche del tubo risultano piccole rispetto a quelle del risonatore e la perturbazione elettrica del risonatore stesso non è grande; l'induttanza equivalente del risonatore può essere fatta grande in modo da ridurre il più possibile la corrente totale favorendo così il funzionamento a larga banda. Con questi criteri si è scelto un risonatore di tipo coassiale asimmetrico con dimensioni meccaniche esterne eguali a quelle massime consentite dalle sezioni diritte del magnete e l'elettrodo interno è stato calcolato in modo da portare in frequenza il risonatore tenendo ovviamente conto delle capacità parassita introdotta dalla valvola eccitatrice. Nella fig. 10 sono riportate quelle dimensioni meccaniche che influenzano il comportamento elettrico del risonatore.

Segue che anche con modulazione di ampiezza del tipo *niente-tutto* ed eccitazione costante la tensione al gap (e cioè la tensione di placca) andrà variando seguendo in un primo tempo la curva di risonanza per poi saturare

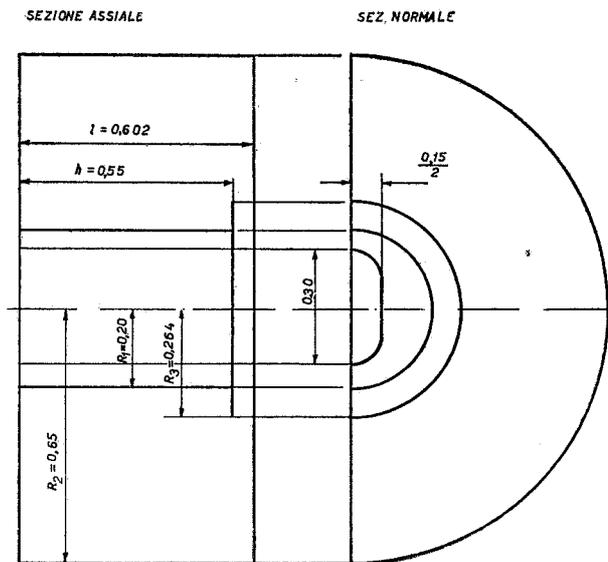


Fig. 10. — Dimensioni meccaniche che influenzano il comportamento elettrico del risonatore.

rapidamente verso valori vicini a quello della tensione di alimentazione quando l'impedenza della cavità diventa troppo grande rispetto a quella adatta per un normale funzionamento del tubo elettronico. In altri termini la valvola finale viene a passare da condizioni molto vicine a quelle di corto circuito a condizioni di funzionamento assai prossime a quelle di circuito aperto. Nessuna di queste due condizioni è una buona condizione di funzionamento della valvola, ma poichè il ciclo di utilizzazione è molto basso non vengono mai superati i limiti imposti dalle dissipazioni anodica e di griglia per il tubo scelto.

Nella fig. 11 a è riportato lo schema del gruppo *amplificatore-cavità*. La fotografia riportata in fig. 11 b mostra l'interno della cavità RF_1 dopo l'assemblaggio.

Come si può vedere la valvola (triodo Siemens RS1001L) è montata con la griglia a terra per avere una buona neutralizzazione ed è alimentata di catodo anzichè di placca

verso un gruppo di quattro EL34 in parallelo funzionanti a inseguitore catodico.

Questo tipo di polarizzazione è stato impiegato in tutto

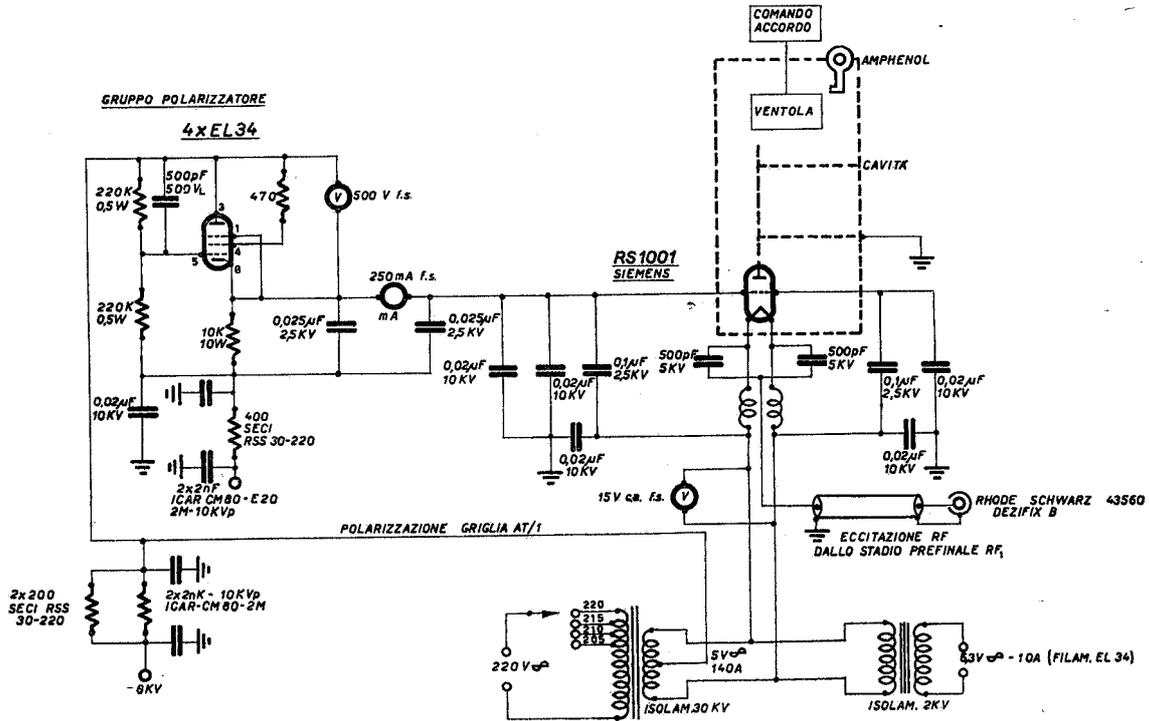


Fig. 11. a) — Schema elettrico del gruppo finale cavità.

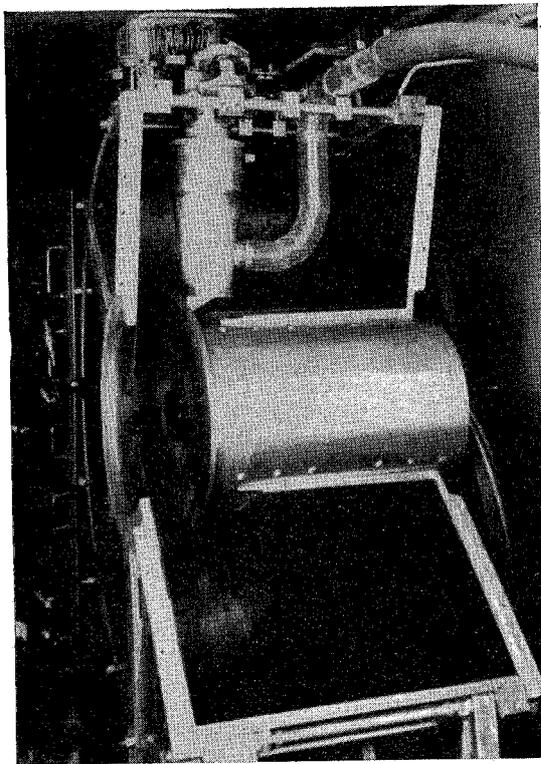


Fig. 11. b) — Interno della cavità RF. dopo l'assemblaggio.

per evitare il condensatore di accoppiamento ed il circuito di blocco sulla placca del tubo.

La tensione di polarizzazione (naturalmente riferita al catodo che è connesso con l'alta tensione) è fornita tra-

l'impianto di RF in quanto permette di ottenere una tensione di polarizzazione su impedenza estremamente bassa senza ricorrere ad alimentatori di potenza eccessiva; questo punto è particolarmente importante in quanto in entrambi gli impianti le correnti di griglia variano molto durante il ciclo di eccitazione mentre le tensioni di polarizzazione devono rimanere il più possibile costanti.

Tutta la catena amplificatrice della RF_1 è allineata in modo da dare la massima eccitazione sul catodo della valvola finale alla frequenza iniziale mentre la cavità risonante (caricata dalla valvola) è accordata sulla frequenza finale. In questo modo si hanno le migliori prestazioni dall'impianto.

d) Impianto RF_2 .

Nella parte introduttiva sono state esaminate le prestazioni richieste a questo impianto. L'esperienza, però, acquista dal funzionamento di altri sincrotroni (Cornell, Caltech, ecc.) impone, all'impianto della RF di potenza, requisiti di adattamento che non risultano direttamente dal calcolo teorico.

Nel progettare, quindi, questo impianto si è tenuto conto di tutte le possibili esigenze suggerite dalla esperienza e pertanto tutto l'impianto RF_2 si scosta notevolmente dai normali trasmettitori per radio e televisione.

Data la notevole tensione che si deve manifestare al gap del risonatore di potenza si è deciso che la parte alta tensione del risonatore fosse completamente sotto vuoto. Per poter alimentare il risonatore senza modificare molto la geometria si è deciso di eccitare la cavità stessa con un amplificatore di potenza completamente separato dal risonatore ed accoppiato con questo per mezzo di un cavo coassiale adattato. Così facendo si ha il vantaggio di perturbare pochissimo il risonatore perchè la spira di accoppiamento (che è alimentata con un cavo coassiale da 60 Ω) può risultare molto piccola e di poter variare le caratteristiche dell'alimentatore senza variare quelle del risonatore.

In secondo luogo per poter modulare comodamente e nel modo voluto la tensione radiofrequenza che si manifesta al gap del risuonatore, è stata prevista la possibilità di inserire la modulazione in uno qualunque degli stadi dell'amplificazione di potenza.

La modulazione è ottenuta variando la polarizzazione di griglia negli ultimi tre stadi.

Questo sistema non consente il miglior rendimento e la miglior linearità, ma è stato scelto per ragioni di sicurezza e semplicità di funzionamento. I modulatori ri-

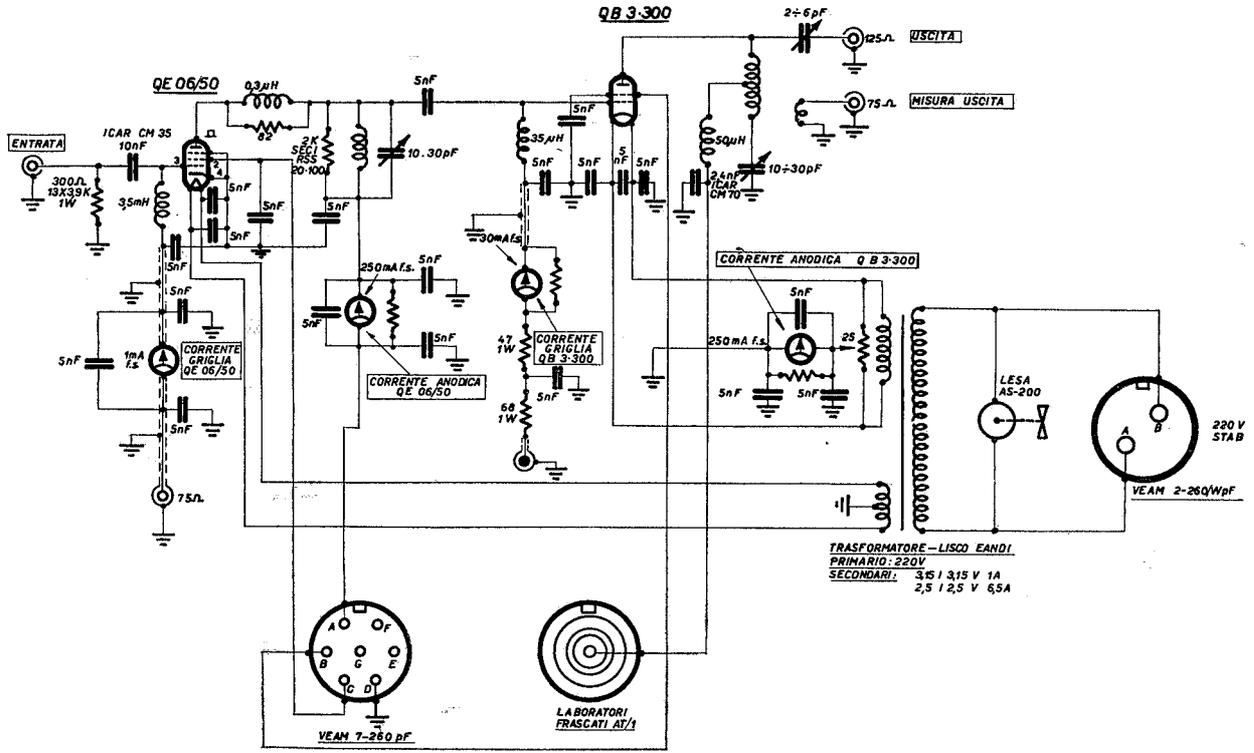


Fig. 12. — Primo e secondo amplificatore catena RF₂.

Inoltre a causa dell'alto fattore di merito del risuonatore (superiore a 6000) è stato necessario prevedere un doppio sistema di accordo della cavità. Il primo sistema (accordo manuale) comanda una grossa ventola posta nella cavità (parte in aria) e serve ad accordare il risuonatore sulla frequenza di funzionamento scelta permettendo una variazione dell'accordo stesso entro il 2% della frequenza centrale; il secondo sistema (accordo automatico) comanda una piccola ventola, posta pure nel risuonatore, che serve a compensarne le derive termiche.

Questa ventola è comandata direttamente dal discriminatore che rivela la fase tra la tensione sulla spirale di eccitazione e la tensione che si manifesta ai capi di una piccola spirale posta nel risuonatore. Segue da ciò che il discriminatore in questione « sente l'accordo del risuonatore » e può quindi comandare la ventola di compensazione nel modo voluto.

d-1) La catena amplificatrice RF₂.

L'impianto RF₂ serve ad eccitare la cavità di potenza e consta di quattro unità amplificatrici i cui schemi sono riportati nelle figg. 12, 13, 14.

Il segnale pilota viene prelevato dalla catena RF₁, come già detto, e, attraverso una linea artificiale a ritardo variabile, va ad eccitare tutta la catena. Poichè in questo modo il risuonatore della RF₂ viene eccitato con la stessa frequenza e fase prescelta rispetto al risuonatore RF₁, vengono grandemente ridotte le perdite del fascio al momento dello scambio tra le due cavità ecceltrici.

La serie degli amplificatori che costituiscono la catena della RF₂ è di tipo convenzionale; l'amplificatore terminale è montato con circuiti a costanti distribuite in vista delle grandi dimensioni della valvola finale e la connessione del tipo griglia a massa è sufficiente ad assicurare una buona neutralizzazione.

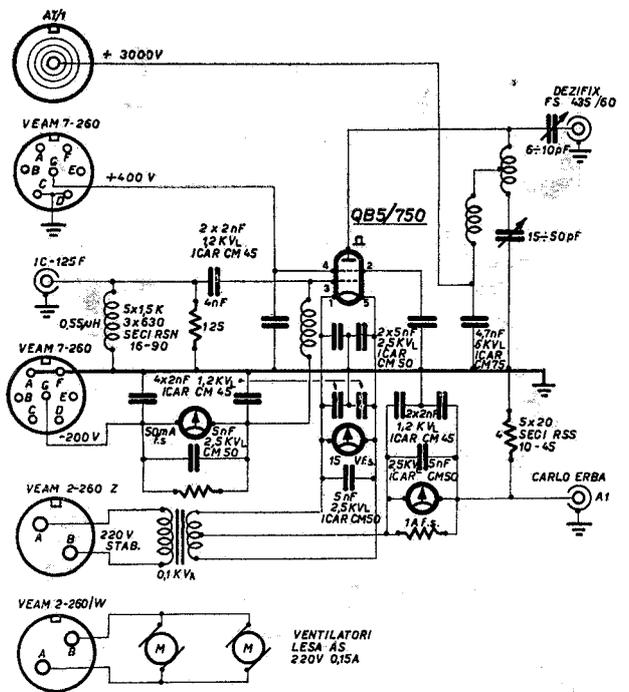


Fig. 13. — 3° amplificatore catena RF₂.

sultano difatti costituiti da apparecchiature di piccola potenza comandabili direttamente dal circuito di sincronizzazione principale e permettono di cambiare con estrema facilità la forma dell'involuppo della tensione a ra-

diofrequenza in cavità. Questo è molto importante in quanto la forma della tensione a radiofrequenza richiesta

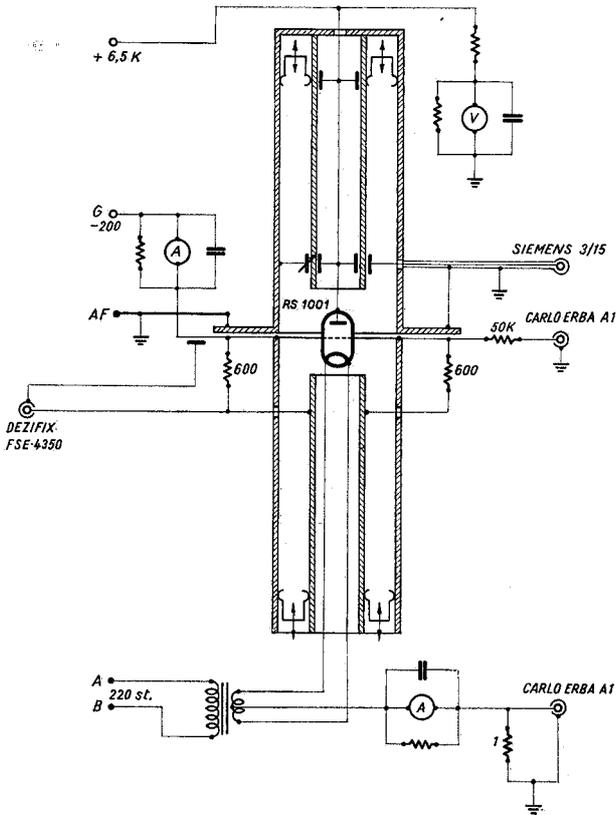


Fig. 14. — 4° amplificatore - stadio finale - catena RF₂.

dipende fortemente dal tipo di esperienza che si vuole eseguire con il Sincrotrone.

e) La cavità di potenza.

La cavità per alta tensione è di tipo rientrante simmetrico e la fig. 15 ne mostra le dimensioni ed i dettagli costruttivi. Come risulta dalla fig. 15 la parte alta ten-

si dirà tra breve). Le due piastre di ottone ramato e l'elettrodo coassiale sono tenute nelle posizioni volute con un tubo di quarzo (sezione cilindrica - lunghezza 490 mm - diametro interno 500 mm, spessore 14 mm); entro il tubo di quarzo viene fatto il vuoto aspirando direttamente attraverso la ciambella. L'elettrodo coassiale appoggia sul cilindro di quarzo attraverso 6 piedini, montati su due anelli (3 per anello) e distanziati tra di loro a 120°.

Il complesso delle piastre; del tubo di quarzo e degli elettrodi è tenuto assieme da 4 tiranti che vengono smontati solo dopo che nel tubo di quarzo è stato fatto il vuoto.

Il contatto tra le piastre di ottone ramato e la parte induttiva della cavità è ottenuta serrando fortemente un filo di rame argentato tra le piastre in questione ed una corona circolare (di rame), saldata direttamente all'involucro della cavità.

Gli elettrodi collegati alle flange sono raffreddati ad acqua; l'elettrodo coassiale, che deve essere mantenuto ad una d.d.p. continua di 5000÷8000 volt contro terra è raffreddato ad olio ed i tubi di andata e di ritorno (tubi di rame) passano attraverso il quarzo mediante una saldatura a tenuta di vuoto realizzata con araldite.

Come si è detto l'elettrodo coassiale ha la funzione di accrescere la capacità tra i due elettrodi affacciati e di prevenire la scarica a multypacting.

Questo fenomeno di scarica, che impedirebbe alla cavità di raggiungere alte tensioni si può descrivere in maniera molto semplificata come segue.

Tra gli elettrodi che costituiscono il gap si può trovare sempre qualche elettrone libero. Questa particella viene accelerata dal campo a RF e per una data frequenza di eccitazione esisterà un valore per la tensione di picco per il quale il tempo di transito di una particella è uguale al semiperiodo della tensione acceleratrice.

Quando l'elettrone, accelerato in queste condizioni, colpisce l'altro elettrodo, può estrarre più di un elettrone e gli elettroni estratti trovano il campo favorevole per essere accelerati contro l'elettrodo di partenza. Il fenomeno è quindi rigenerativo. La corrente elettronica tra le armature sulla cavità può divenire così elevata da rappresentare un notevole carico per il risonatore per cui la tensione della cavità si blocca intorno a quel valore per il quale il fenomeno innesca.

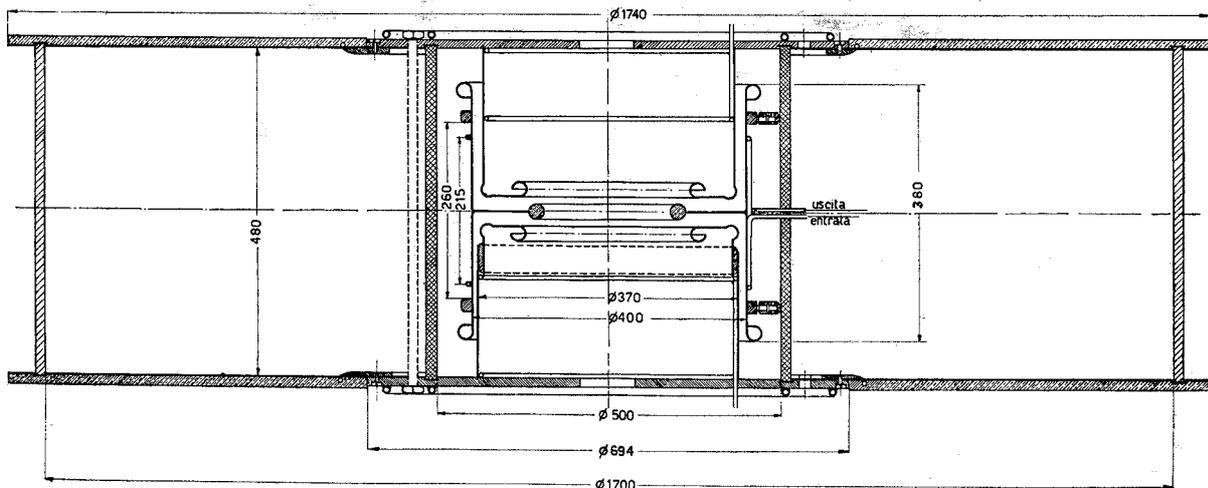


Fig. 15. — Sezione cavità RF₂.

sione della cavità è costituita dai due elettrodi cilindrici saldati a due piastre di ottone ramato (spessore 18 mm). I due elettrodi sono separati da un terzo elettrodo coassiale al precedente che ha funzione di accrescere la capacità del gap e di evitare la scarica a multypacting (come

Molti metodi sono utili per prevenire il multypacting: uno per esempio consiste nel traversare rapidamente con la tensione le zone pericolose: ma nel nostro caso questo sistema non è applicabile in quanto la tensione iniziale della RF₂ non può essere troppo alta.

Il metodo usato qui consiste nell'inserire uno schermo tra gli elettrodi che viene mantenuto a tensione costante contro terra e cioè contro gli elettrodi stessi. In questo modo si ha una dissimetria fra le condizioni di andata e ritorno degli elettroni per cui il fenomeno di risonanza è evitato.

Naturalmente l'aggiunta di questo elettrodo comporta complicazioni meccaniche e maggiori perdite elettriche nel risuonatore.

Tutto il risuonatore, una volta assemblato risulta molto rigido e poco sensibile alle vibrazioni meccaniche.

CIAMBELLA A VUOTO.

La camera a vuoto, detta ciambella, è stata costruita in araldite e quarzo: la metallizzazione è ottenuta mediante strisce di acciaio inossidabile (strisce per evitare correnti parassite) (vedi fig. 16).

Nella ciambella, costituita da settori collegati l'uno all'altro con guarnizioni, sono lasciate finestre di materiale trasparente per potere osservare il fascio.

Il vuoto è dinamico ed ottenuto con pompe a diffusione e pompe rotative. L'impianto di vuoto consta di 4 banchi completamente automatici equipaggiati con pompe rotative e a diffusione:

- ciascuna pompa rotativa ha portata di 60 m³/h;
- ciascuna pompa a diffusione ha portata di 3 000 l/s.

La pressione che si realizza è, in ciambella, di 2×10^{-6} mm di Hg. Tale vuoto è richiesto per evitare che le particelle negli urti con le molecole residue di gas subiscano deviazioni troppo forti e che perciò vengano perdute in urti contro le pareti.

L'INIETTORE, LA RICERCA DEL FASCIO E LA SALA CONTEGGIO.

L'iniettore è un acceleratore elettrostatico Van de Graaff da 3 MeV e 3 mA continui normali, costruito dalla High Voltage Corporation. Questa macchina è del tipo convenzionale ben noto e per tanto non viene qui descritta.

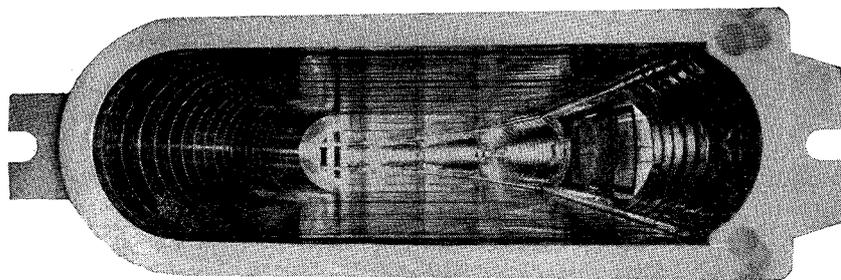


Fig. 16. — Sezione Ciambella.

In questa macchina la sorgente è stata modificata in modo da poter essere pulsata ed erogare, sotto impulso, delle correnti molto più intense di quella nominale. Difatti questa nelle condizioni di funzionamento sul Sincrotrone può erogare un fascio da ~ 40 mA per 2 μ s alla energia di 3 MeV cinetici.

Il comando dell'iniettore come quelli per la RF vengono derivati dal campo magnetico con segnali presi da fili di mumetal, opportunamente polarizzati, immersi nel campo magnetico del magnete principale.

Per la messa a punto della macchina e per il controllo del buon funzionamento sono stati predisposti dispositivi ausiliari atti a rivelare la presenza e il comportamento del fascio.

Possiamo ricordare, per esempio, le bandierine semi-trasparenti di materiale fluorescente con le quali si può vedere il fascio circolante nella macchina per i primi giri dopo l'iniezione. Iniettando nella macchina, per un

tempo inferiore al periodo di rivoluzione fasci con ridotta intensità e opportunamente collimati, si possono rilevare le orbite delle particelle, e correggere gli errori di campo all'iniezione.

Con gli elettrodi raccoglitori e ad induzione, e con metodi con cui si rileva la intensità di radiazione del fascio nel campo del visibile si può controllare il fascio durante il periodo di accelerazione.

Tutti i comandi sono riportati in un'unica sala: *Sala Controllo*, dalla quale gli operatori possono controllare le varie parti dell'impianto. Nella foto 17 è riportata appunto una veduta dei pannelli generali di comando.

APPENDICE

OSCILLAZIONI DI BETATRONE.

Sia dato un campo magnetico a simmetria cilindrica creato da un magnete toroidale con sezione generatrice a C avente un piano di simmetria.

Consideriamo una particella di una certa velocità che si muove sul piano di simmetria.

L'equazione che descrive il moto è:

$$(1) \quad \frac{m_0 v^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \frac{1}{r} = B_z(R) e v$$

ove:

r = raggio di curvatura della traiettoria

$B_z(R)$ = induzione magnetica assiale in funzione del raggio

R = distanza dall'asse di simmetria

e = carica dell'elettrone

Se poniamo $r = R$ ricaviamo dalla (1) la circonferenza che la particella percorre se iniettata tangente ad essa.

Chiamiamo questa circonferenza *traiettoria principale*: se invece di avere un unico anello, tagliamo il magnete in settori e li distanziamo con sezioni diritte, chiameremo *traiettoria principale* la traiettoria composta dagli stessi archi di circonferenza raccordati dai tratti diritti.

Una particella dopo un giro di rivoluzione si ritrova a ripassare perfettamente per i punti ove era passata durante il giro di rivoluzione precedente nel caso in cui le condizioni iniziali del moto le permettono di descrivere l'orbita principale. Ma in generale ciò non avviene.

Esaminiamo ciò che capita ad una particella che, sempre trovandosi sul piano mediano, inizialmente si trovi scostata rispetto alla circonferenza principale.

Se l'induzione magnetica B_z è esprimibile in prima approssimazione con:

$$(2) \quad B_z(R, z=0) = B_z(R_0, z=0) \left(1 - \frac{nr}{R_0}\right)$$

ove $x = R - R_0$; la traiettoria è descritta dalla equazione:

$$x = X_0 \sin(\sqrt{1-n} \theta + \varphi_x)$$

X_0, φ_x sono date dalle condizioni iniziali; θ definisce la coordinata azimutale.

Se $1-n > 0$ la soluzione è del tipo oscillatorio e quindi la traiettoria oscilla rispetto all'orbita stabile; se $1-n < 0$ la traiettoria è invece di tipo esponenziale, e la particella si allontana sempre più dall'orbita stabile: di conseguenza va perduta.

sezioni diritte i risultati non sono sostanzialmente modificati: solo l'ampiezza di oscillazione viene aumentata di un fattore circa uguale a:

$$k = \frac{2 \pi R + L}{2 \pi R}$$

(R = raggio dei quadranti, L = lunghezza complessiva delle sezioni diritte).

c) Se si rinuncia alla simmetria azimutale del campo magnetico e si alternano tratti ove $n > 0$ con tratti ove

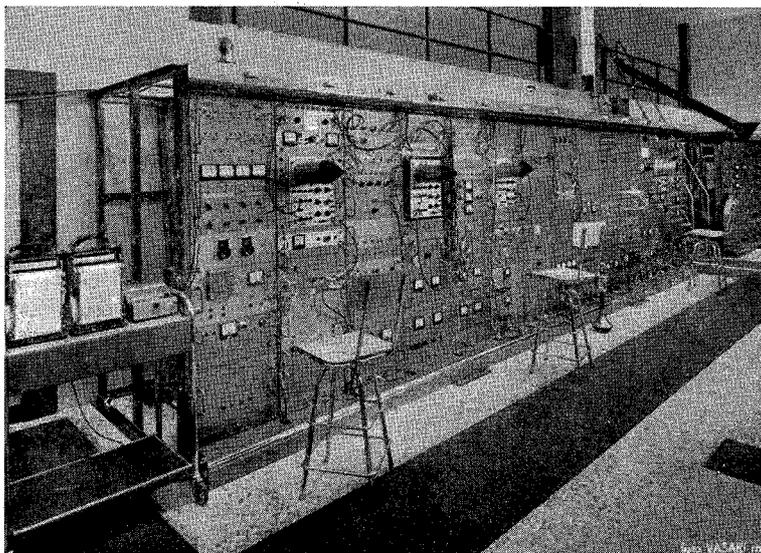


Fig. 17. — Visione parziale della Sala controllo (in fase di sistemazione).

Queste oscillazioni della traiettoria si chiamano *oscillazioni radiali di betatrone*.

L'andamento della componente radiale del campo magnetico segue, per le equazioni di Maxwell, direttamente dalla (2) ed è dato da:

$$(3) \quad B_r = B_0 n \frac{z}{R}$$

Lo scostamento assiale di una particella rispetto al piano mediano è data da:

$$(4) \quad z = z_0 \sin(\sqrt{n} \cdot \theta + \varphi_z)$$

Se $n > 0$ il moto è oscillatorio. Se $n < 0$ la traiettoria seguirebbe una legge esponenziale e si allontanerebbe indefinitamente dall'orbita stabile.

Quindi, affinché si esercitino sulle particelle forze di richiamo sull'orbita stabile, è necessario che sia:

$$(5) \quad 0 < n < 1$$

Una indagine più approfondita del problema del foccheggiamento delle particelle porta alle seguenti conclusioni:

a) La condizione (5) è solo necessaria e non sufficiente affinché le particelle siano richiamate intorno all'orbita stabile.

Infatti bisogna evitare condizioni come $n = 1 - n$ per cui le oscillazioni del betatrone verticali e orizzontali hanno lo stesso periodo.

Si può vedere infatti che anche piccole imprecisioni nel campo magnetico dovute per esempio al non allineamento dei blocchi di ferro del magnete esaltano grandemente l'ampiezza delle oscillazioni.

b) Se il magnete è diviso in settori intercalati da

$n < 0$ allora si possono ritrovare condizioni nella periodicità e nei valori di n per cui si ha ancora foccheggiamento (foccheggiamento forte). In questo caso la traiettoria risulta composta da tratti esponenziali e tratti sinusoidali in modo da essere nell'insieme oscillante intorno all'orbita principale.

Molto importante per aumentare l'intensità del fascio di particelle è realizzare un campo magnetico molto preciso.

OSCILLAZIONI DI SINCROTRONE.

Consideriamo una particella che si muove in un campo magnetico che cresce nel tempo pur rimanendo di forma costante nello spazio.

Ad ogni giro la particella dovrebbe acquistare una energia corrispondente all'aumento del campo magnetico in modo da rimanere sulla medesima circonferenza (od orbita stabile). Lungo la traiettoria deve essere sistemato quindi un dispositivo di accelerazione: in generale si tratta di una cavità risonante eccitata ad una frequenza armonica della frequenza di rivoluzione della particella (6).

L'andamento della tensione di accelerazione V_{HF} è rappresentato in fig. 18 ove con φ_s è indicata la fase con cui una particella deve passare per la cavità risonante per acquistare l'energia corrispondente all'aumento del campo magnetico. Se una particella entra nella cavità con una fase φ_i diversa da φ_s , per es. in ritardo, acquista una energia minore del necessario e per la legge di Lorenz si sposta su un'orbita di minore raggio e per compiere il giro successivo impiega perciò un tempo minore ten-

(6) Ricordiamo che la velocità della particella è praticamente costante e che quindi la frequenza di eccitazione della cavità risonante rimane praticamente costante.

dendo a riportarsi nella fase giusta, cioè vi è stabilità di fase. Le stesse considerazioni valgono per una particella che passa in anticipo.

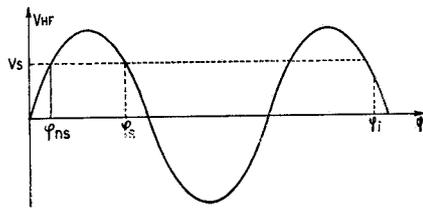


Fig. 18. — Tensione acceleratrice V_{HF} e fase generica i corrispondente al passaggio di una particella attraverso la cavità risonante; s e ns indicano rispettivamente i valori della fase in prossimità dei quali si ha stabilità o instabilità di fase.

La stabilità di fase comporta però oscillazioni radiali della traiettoria che obbligano a prevedere una più am-

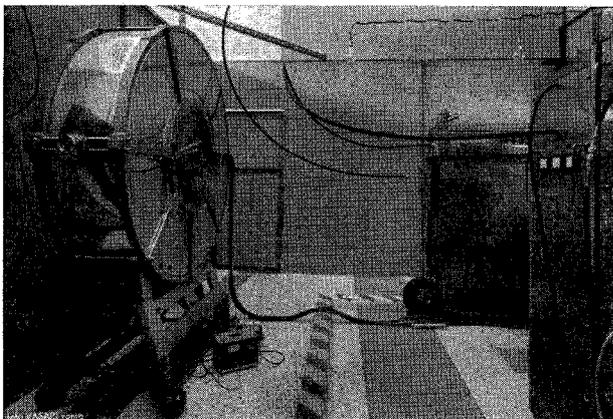


Fig. 19. — La cavità RF_2 durante il colaludo.

sono chiamate *oscillazioni di sincrotrone* e il periodo di pia dimensione radiale dell'intraferro. Queste oscillazioni

oscillazione è di parecchi giri di rivoluzione (qualche decina).

Se una particella passa nella cavità con una fase prossima a φ_{ns} si può facilmente vedere che invece di esservi stabilità di fase si ha instabilità, cioè si esalta la differenza di fase e le oscillazioni tendono ad esaltarsi: infatti, se per es. passa con una fase in ritardo, acquista energia maggiore del necessario a percorrere un giro di rivoluzione, spostandosi su un raggio maggiore per questioni di equilibrio, impiega più tempo e il ritardo aumenta ancora, ecc.

Perciò vengono catturate dalla radiofrequenza solo particelle la cui fase sia prossima a φ_s . L'ampiezza di fase per cui si ha cattura, dipende dalla tensione ai capi della cavità risonante. Si formano così lungo l'anello di accelerazione dei veri e propri pacchetti di particelle separati l'uno dall'altro e in numero pari all'armonica della cavità e di lunghezza complessiva pari a qualche decina di azimut. Le ampiezze delle oscillazioni di sincrotrone dipendono inversamente dalla radice dell'ordine dell'armonica adottata.

IRRAGGIAMENTO.

Le particelle che ruotano perdono energia per irraggiamento come un dipolo oscillante.

La formula che fornisce le perdite di energia per giro è la seguente:

$$(6) \quad L = 0,88 \cdot 10^{-7} \frac{E^4}{R}$$

E è l'energia degli elettroni in MeV; per elettroni da 1000 MeV e con R_0 3,60 m; L è pari a 27000 eV/giro.

La direzione preferenziale di irraggiamento è tangente alla traiettoria.

SMORZAMENTO DELLE OSCILLAZIONI.

Le oscillazioni di betatrone si smorzano con legge inversamente proporzionale alla radice quadrata del campo magnetico per effetti relativistici.

Anche per effetti di irraggiamento si può avere smorzamento delle oscillazioni.

Manoscritto pervenuto il 23 agosto 1961.