

Laboratori Nazionali di Frascati

LNF-62/116 (1962)

M. Ageno e al. : L'ELETTROSINCROTRONE.

Estratto dal: Nuovo Cimento, Suppl. 24, 17 (1962)

PARTE I.

Descrizione generale.

CAPITOLO I

L'elettrosincrotrone.

M. AGENO, A. ALBERIGI QUARANTA, F. AMMAN, C. BERNARDINI, U. BIZZARRI, G. BOLOGNA, G. CORAZZA, G. DIAMBRINI, G. GHIGO, R. HABEL, C. INFANTE, A. MASSAROTTI, G. MONETTI, G. P. MURTAS, E. PERSICO, M. PUGLISI, I. F. QUERCIA, R. QUERZOLI, G. SACERDOTI, G. SALVINI, G. SANNA, S. SIRCANA, P. G. SONA, R. TOSCHI e A. TURRIN

1. - Introduzione.

L'elettrosincrotrone di Frascati (Fig. I.1.1) è stato costruito per accelerare elettroni fino ad una energia massima di poco più di 1 GeV (*). Questi elettroni vengono normalmente utilizzati per produrre, incidendo su un bersaglio posto entro la macchina, un fascio esterno di raggi γ di energia massima pari a quella degli elettroni accelerati (fascio di « bremsstrahlung »).

I fasci di raggi γ così prodotti vengono impiegati per lo studio delle interazioni tra la radiazione elettromagnetica e la materia. Questo tipo di indagine riveste un elevato interesse poichè può consentire di aumentare in modo risolutivo le nostre conoscenze sulle forze nucleari ed elettromagnetiche tra particelle elementari.

Nella Fig. I.1.2 è rappresentata la massa creabile M (in MeV/c²) nell'urto fotone-protone, in funzione dell'energia E_γ (in MeV) del fotone. Come mostra tale figura la disponibilità di un fascio di fotoni da 1000 MeV permette teoricamente di creare fino a 5 mesoni π e rende quindi anche realizzabili processi di creazione di mesoni pesanti (mesoni K).

Gli argomenti di ricerca sviluppabili disponendo di un elettrosincrotrone (e.s.) da 1 GeV possono essere così raggruppati:

- Fotoproduzione singola e multipla di pioni carichi e neutri.
- Fotoproduzioni di particelle strane (mesoni pesanti ed iperoni). Le reazioni possibili con la limitazione di energia massima dell'e.s. di Frascati sono

(*) 1 GeV = 10³ MeV = 10⁹ eV. Dati esatti sull'energia e sull'intensità degli elettroni accelerati sono forniti nella Sez. 5, B), 3) di questo Capitolo.

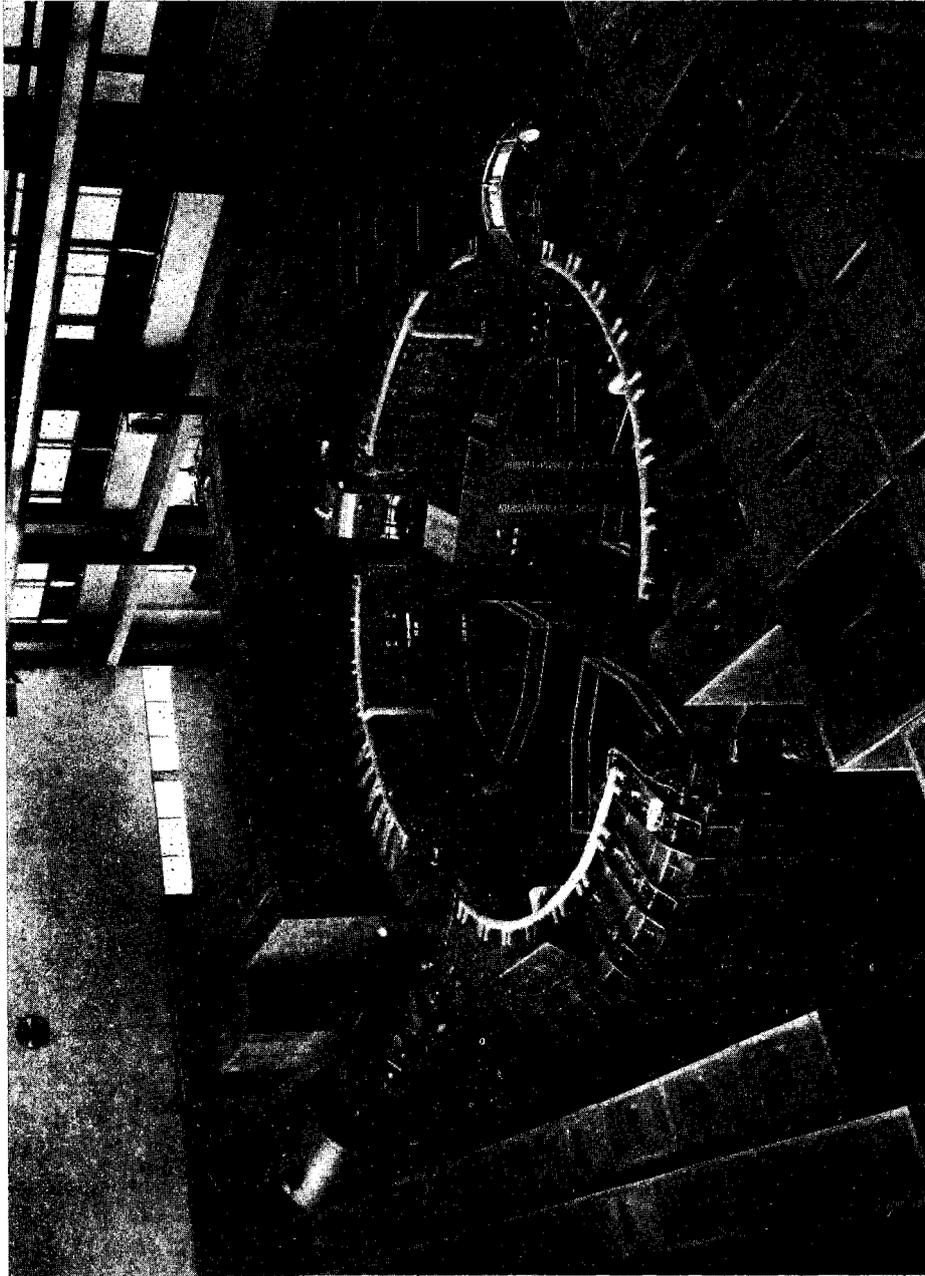
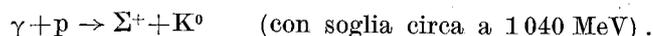
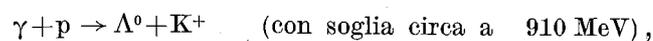


Fig. I.r.1. - Veduta d'insieme dell'elettrosincrotrone. In alto a sinistra l'iniettore Van de Graaff.

essenzialmente del tipo:



— Esperienze di elettrodinamica pura. Queste esperienze, in genere molto fini, sono destinate ad una seconda approssimazione sulle attuali conoscenze dei processi elettrodinamici ad alta energia.

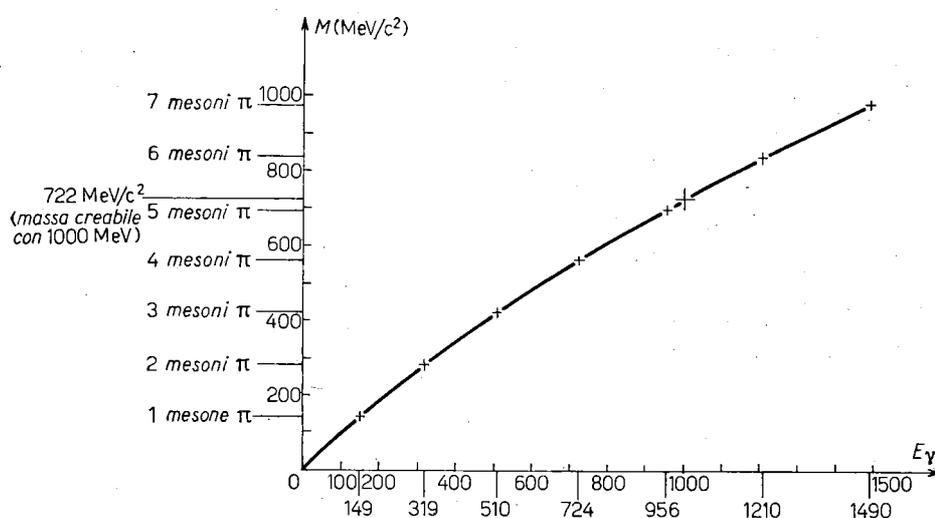


Fig. I.1.2. — Ascisse: energia E_γ del fotone urtante contro un nucleone fermo. Ordinate: massima massa creabile M (in MeV/c^2 ; $c=1$) da un fotone di energia E_γ . Sono indicate esplicitamente sulle ascisse e sulle ordinate, rispettivamente, le energie di soglia per la creazione di determinate particelle e la natura di queste.

— Esperienze con elettroni e fotoni destinate allo studio dei fattori di forma nucleari.

— Produzione per via elettromagnetica di coppie di particelle di carica opposta (μ^\pm ; π^\pm).

In vista di un tale programma di ricerche si è cercato, nella realizzazione pratica dell'e.s., di ottenere fasci di raggi γ particolarmente intensi per consentire l'indagine di fenomeni con sezioni d'urto assai piccole (quali ad esempio i processi di produzione di coppie di mesoni μ). È inoltre ovvio che una elevata intensità di raggi γ risulta comunque vantaggiosa ai fini della rapidità e della precisione con cui si possono raccogliere informazioni sui fenomeni in studio.

La realizzazione di un e.s. avente energia massima e intensità quanto più possibile elevate apparve quindi fortemente desiderabile ai fini delle ricerche suddette, e pertanto alla fine del 1953 ne fu decisa la costruzione.

Come conclusione a questa breve introduzione, dobbiamo richiamare i criteri che hanno portato alla scelta di un e.s. piuttosto che di una macchina acceleratrice di un altro tipo. Volendosi realizzare una macchina destinata ad accelerare elettroni all'energia massima di 1000 MeV, la prima alternativa che ci si può porre riguarda la scelta tra un acceleratore di tipo circolare e un dispositivo di accelerazione a sviluppo lineare. Nel primo caso conviene fissarsi sull'e.s., scartando il betatrone per gli ovvi limiti in energia e ingombro di questa macchina.

La seconda possibilità è invece costituita dall'acceleratore lineare. La nostra preferenza per il primo (elettrosincrotrone) è stata determinata da vari motivi e tra questi ricordiamo innanzi tutto la durata del fascio di raggi γ prodotti, molto maggiore (qualche ms) per l'e.s., che non per l'acceleratore lineare (circa 1 μ s). Questa diversità consente d'impiegare nel primo caso tecniche elettroniche di selezione temporale, che non si possono usare con l'acceleratore lineare.

L'acceleratore lineare richiede inoltre l'impiego di klystrons di potenza il cui approvvigionamento o la cui costruzione si presentava alquanto difficile, in Italia, quando venne fissato il programma costruttivo.

Avendo stabilito di orientarsi sull'e.s. restava ancora da decidere il tipo di focheggiamento. Non era funzionante allora ancora alcuna macchina a focheggiamento forte, mentre per il focheggiamento debole vi era già una notevole esperienza acquisita. La scelta [1] in favore di quest'ultima possibilità si inquadra nella generale direttiva che abbiamo seguita nel nostro lavoro, di costruire, cioè, una macchina, mantenendo un largo margine per quanto riguarda la sicurezza di funzionamento e la facilità di messa a punto sia all'inizio che durante il normale esercizio. Per questo motivo anche le componenti principali della nostra macchina sono tutte ragionevolmente sovradimensionate, per quanto lo consentivano le nostre disponibilità finanziarie.

La rapidità della messa a punto e dell'entrata in esercizio del nostro e.s., dopo che ne era stata ultimata la costruzione, sembra confermare la fondatezza del nostro orientamento. Questo è anche confermato dal limitato numero di guasti durante l'esercizio.

2. - Principio di funzionamento.

Nella presente Sezione, pur svolgendo considerazioni di carattere generale, intendiamo riferirci in modo particolare alla struttura tipica del nostro e.s. Tale struttura è schematicamente rappresentata nella Fig. I.I.3. Si fa inoltre notare fino da adesso che saranno usate, salvo contrario avviso, unità di misura del Sistema Giorgi.

In un e.s. gli elettroni, dopo aver subito una preaccelerazione (v. Sez. 3, D)) ad una energia moderata (in genere minore di 10 MeV) ad opera di un acceleratore elettrostatico o lineare, sono immessi in una camera a vuoto di forma anulare posta dentro il traferro di un elettromagnete a campo periodico [2, 3]. Al termine della fase di iniezione, al cui meccanismo accenneremo brevemente più oltre (v. Parte II, Sez. 3), e per tutta la fase di accelerazione, gli elettroni

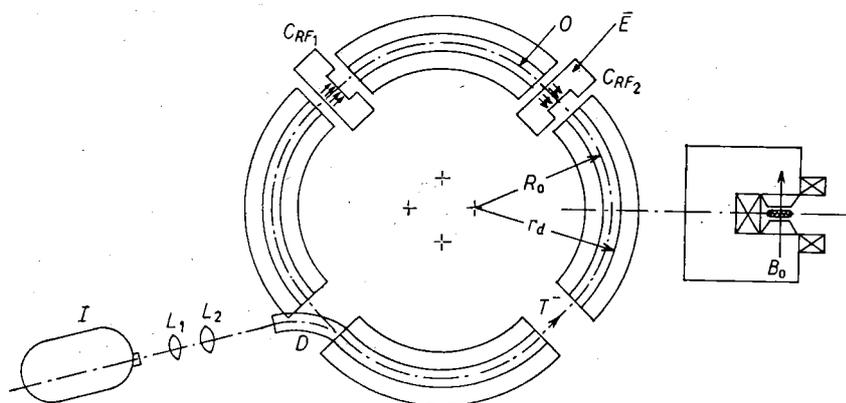


Fig. I.1.3. - Struttura schematica dell'elettrosincrotrone.

circolano in prossimità di un'orbita chiusa fissata, in equilibrio tra la forza centrifuga e la forza di Laplace-Lorentz. L'orbita chiusa può essere circolare oppure, come ormai si usa, essere costituita da archi di cerchio (corrispondenti ai settori magnetici) raccordati tra loro da tratti rettilinei (corrispondenti ai tratti privi di campo magnetico). I tratti dritti di raccordo sono tangenziali agli estremi degli archi contigui. L'orbita chiusa risultante presenta sempre in ogni suo punto curvatura o nulla o di un medesimo segno. Tale struttura è nota con il nome di « racetrack ».

Ad ogni istante il raggio di curvatura R_0 dell'orbita dentro un settore magnetico, il valore dell'induzione magnetica B_0 , la quantità di moto p e la carica q dell'elettrone sono legate dalla ben nota relazione:

$$(I.1.1) \quad R_0 = \frac{p}{|q| B_0}.$$

Per tutta la durata della fase di accelerazione, gli elettroni sono sottoposti all'azione di campi elettrici periodici, sincroni con la loro frequenza di rivoluzione orbitale e situati in punti prestabiliti dell'orbita, mentre il campo magnetico $B_0(t)$ cresce nel tempo, in modo da soddisfare costantemente

alla (I.I.1). I campi elettromagnetici acceleratori a radiofrequenza sono solitamente ottenuti eccitando delle cavità risonanti mediante opportuni generatori.

Il campo magnetico è limitato al traferro di un certo numero di elettromagneti a settore costituenti nel loro complesso il magnete. Nelle macchine cosiddette a « focalizzazione debole » le espansioni polari sono profilate in modo tale da produrre, nel piano mediano del traferro, un'induzione variabile col raggio secondo la legge

$$(I.I.2) \quad B_z = B_0 \left(\frac{R_0}{r} \right)^n,$$

dove n è l'indice del campo, per cui vale la doppia disequazione

$$(I.I.3) \quad 0 < n = - \frac{r}{B_z} \frac{\partial B_z}{\partial r} < 1,$$

B_0 , B_z sono le componenti verticali dell'induzione \mathbf{B} rispettivamente nei punti di raggio R_0 ed r .

La legge (I.I.2) e la limitazione (I.I.3) si rendono necessarie per ottenere contemporaneamente la focalizzazione orizzontale e verticale degli elettroni [4].

Per evitare infatti che gli elettroni a causa di perturbazioni di varia origine (errori di posizione, angolo ed energia all'iniezione, effetti di carica spaziale, diffusione dovuta al gas residuo della camera a vuoto, inomogeneità magnetiche, ecc.) si allontanino progressivamente dall'orbita di equilibrio, il campo magnetico deve poter esercitare sugli elettroni in movimento fuori dall'orbita di equilibrio forze di richiamo proporzionali allo spostamento tra questi e l'orbita suddetta [5]. Queste forze determinano oscillazioni « libere o di betatrone » orizzontali e verticali le cui frequenze sono rispettivamente

$$(I.I.4) \quad \nu_r = \nu_0 \sqrt{1-n}, \quad \nu_z = \nu_0 \sqrt{n},$$

nelle quali $\nu_0 = c\beta/2\pi R_0 A$ è la frequenza della rivoluzione orbitale. Il fattore A è il fattore di allungamento dell'orbita dovuto alla presenza dei tratti rettilinei inseriti nell'orbita di equilibrio stessa (sezioni diritte). Per l'e.s. di Frascati (Fig. I.I.3) esso si può scrivere

$$(I.I.5) \quad A = \frac{2\pi R_0 + 4L}{2\pi R_0} = 1 + \frac{2L}{\pi R_0}.$$

La teoria completa del fenomeno mostra che le oscillazioni libere subiscono uno smorzamento adiabatico al crescere del campo magnetico secondo la legge $B_0^{-\frac{1}{2}}$.

La scelta dell'indice n viene inoltre effettuata tenendo presente la possibilità di accoppiamenti tra le oscillazioni libere orizzontali e verticali ed eventualmente tra queste ed il moto orbitale (risonanze). Uno studio dettagliato di questi effetti viene riportato nella Parte II, Sez. 2.

Vogliamo ora accennare brevemente al meccanismo con il quale gli elettroni sono iniettati entro la macchina. Gli elettroni preaccelerati ad una energia di qualche MeV sono immessi dalla bocca di uscita di un deflettore elettrostatico (v. Sez. 3, *D*)) tangenzialmente ad un'orbita di raggio $r_a > R_0$, quando il campo magnetico crescente ha raggiunto il valore appropriato alla loro quantità di moto p . Questo valore è dato dalla relazione: $B_i = p/|q|r_a$.

Poichè il processo di accelerazione non si è ancora iniziato, la quantità di moto p degli elettroni resta costante, mentre il campo magnetico cresce con velocità $(dB_0/dt)_i$ (*). Ne consegue una progressiva concentrazione dell'orbita (spiralizzazione) con una contrazione radiale per giro data da

$$(I.I.6) \quad \sigma = \frac{R_0}{(1-n)} \frac{T_i}{B_i} \left(\frac{dB_0}{dt} \right)_i \quad (\text{m/giro}).$$

In essa T_i è il periodo di rivoluzione degli elettroni all'iniezione.

Le particelle iniettate inizialmente seguono (se si possono trascurare gli errori di posizione, angolo ed energia) l'orbita che si contrae, mentre quelle iniettate negli istanti successivi oscillano attorno a quest'orbita con ampiezza $r_a - r$, essendo r il valore del raggio che compete al valore che il campo magnetico ha raggiunto nell'istante in cui la particella è stata iniettata. Poichè in generale si pone $r_a - R_0$ pari alla semiampiezza radiale della regione di campo utile per la focalizzazione (regione in cui vale la (I.I.2) con il valore prefissato per n), non conviene protrarre il processo di iniezione per un intervallo di tempo superiore a

$$(I.I.7) \quad \Delta t_i = \frac{r_a - R_0}{\sigma} T_i.$$

Al termine di tale intervallo viene acceso l'oscillatore a RF ed ha inizio il processo di accelerazione. Mentre il campo magnetico cresce nel tempo, la frequenza del campo elettrico nella cavità varia con la legge

$$(I.I.8) \quad \nu = K \frac{c\beta}{2\pi R_0 A} = \frac{Kc}{2\pi R_0 A} \frac{e|q|B_0 R_0}{\sqrt{(cqB_0 R_0)^2 + E_0^2}}.$$

(*) Si può ritenere trascurabile l'effetto che il campo elettrico indotto dalla variazione del campo magnetico ha sugli elettroni (effetto di betatrone).

Nella (I.I.8) K indica l'ordine dell'armonica della frequenza orbitale scelta per effettuare l'accelerazione, mentre q ed E_0 sono rispettivamente la carica e l'energia di quiete dell'elettrone. Ad esempio per la macchina di Frascati è stato scelto $K=4$, cioè la frequenza del campo elettrico è pari a 4 volte la frequenza orbitale. Ciò corrisponde all'accelerazione del fascio elettronico in 4 bunches tra loro separati. Considerazioni relative alla convenienza della scelta dell'armonica sono svolte nella Parte V.

La $v(B_0)$ è quindi una funzione crescente che tende asintoticamente al valore limite $c/2\pi R_0 \Lambda$.

Le particelle la cui energia E_s soddisfa alla relazione

$$(I.I.9) \quad B_0 R_0 = \frac{\sqrt{E_s^2 - E_0^2}}{c \cdot |q|},$$

e che attraversano il gap della cavità risonante in corrispondenza di una certa fase φ_s (fase sincrona) del segnale accelerante, ruoteranno sull'orbita di equilibrio di raggio R_0 con velocità angolare ω_s senza compiere alcuna oscillazione (particelle sincrone). Esse guadagnano ad ogni giro l'ammontare esatto di energia necessario a mantenersi sul raggio R_0 nonostante l'aumento del campo $B_0(t)$.

Gli elettroni che posseggono energie diverse o fasi diverse (entro certi limiti) rispettivamente da E_s (energia sincrona) e φ_s oscillano stabilmente in fase attorno a φ_s (oscillazioni di fase).

Si può dimostrare (v. Parte II, bibliografia ivi citata) che affinché si abbiano condizioni di funzionamento stabile della macchina relativamente alle oscillazioni di fase è necessario che gli elettroni attraversino il risuonatore in corrispondenza del ramo discendente della sinusoide rappresentante la tensione acceleratrice.

La frequenza delle oscillazioni di fase è molto minore della frequenza delle oscillazioni betatroniche, ed è data dalla relazione [6]

$$(I.I.10) \quad \Omega_0^2 = \frac{\omega_s^2 K \alpha |q| V_M}{2\pi E_s \Lambda},$$

dove: $\alpha = 1/(1-n)$, e V_M è la tensione massima al gap del risuonatore.

Alle oscillazioni di fase sopra accennate sono associate oscillazioni radiali (oscillazioni di sincrotrone) le cui ampiezze si smorzano al crescere dell'energia totale E degli elettroni secondo la legge E^{-2} .

Per un'analisi dettagliata del meccanismo di cattura degli elettroni iniettati entro l'intervallo di fasi stabili all'istante di accensione del campo elettrico acceleratore nella cavità, si rimanda allo studio effettuato da PERSICO [7].

Per effetto dell'accelerazione centripeta a cui sono con continuità sotto-

posti gli elettroni circolanti sull'orbita di equilibrio, questi irradiano energia elettromagnetica. Nella regione relativistica estrema le perdite di energia per giro sono date da una relazione del tipo [8]

$$(I.I.11) \quad W = \frac{\text{cost}}{R_0} \left(\frac{E}{E_0} \right)^4.$$

Tali perdite crescono quindi molto rapidamente al crescere dell'energia totale E degli elettroni. L'intensità massima dello spettro continuo irraggiato si ha a una frequenza che è un'armonica di diversi ordini più alta della frequenza orbitale. Più precisamente la frequenza corrispondente a tale massimo è data dalla relazione

$$(I.I.12) \quad \nu = \frac{c}{2\pi R_0 \lambda} \left(\frac{E}{E_0} \right)^3.$$

Questa radiazione che è praticamente incoerente e polarizzata, è emessa per la maggior parte in uno stretto cono di semiapertura E_0/E attorno alla direzione istantanea della velocità degli elettroni.

L'analisi dal punto di vista quantistico [9, 10] dell'irraggiamento di un sincrotrone di alta energia sviluppata mostra che, a causa dell'emissione statistica di fotoni, vengono indotte oscillazioni di fase e di sincrotrone. Queste oscillazioni indotte stabiliscono un limite alle dimensioni radiali del fascio elettronico, e comportano la necessità di un più alto valore della tensione di picco della radiofrequenza acceleratrice.

Le forti perdite per irraggiamento che si hanno alle alte energie costituiscono la più seria difficoltà nella realizzazione di elettrosincrotroni di energie dell'ordine di diversi GeV, in quanto sono richiesti impianti acceleratori a radiofrequenza di potenza molto elevata.

In un e.s. non limitato dalla potenza dell'impianto di accelerazione a radiofrequenza, l'energia massima E_{max} alla quale possono essere accelerati gli elettroni è limitata dal raggio dell'orbita di equilibrio R_0 e dal valore massimo B_{0max} che l'induzione magnetica può raggiungere. Ad esempio per $B_{\text{0max}} \approx 1 \text{ Wb/m}^2$, si ha

$$E_{\text{max}} \approx 3 \cdot 10^8 R_0 \quad (\text{eV, m}).$$

Quando si è raggiunta l'energia massima, cioè al termine del ciclo di accelerazione, gli elettroni spiralizzano (soprattutto a causa delle perdite per irraggiamento) verso l'interno della camera a vuoto e vanno a collidere su una piastrina metallica (targhetta) producendo l'emissione di un fascio ben collimato di radiazione elettromagnetica di elevata energia (fascio γ).

Al fine di allungare l'intervallo di tempo durante il quale avviene la colli-

sione del fascio elettronico (e quindi l'emissione del fascio γ) si cerca di ridurre la rapidità della spiralizzazione determinata dalle perdite per irraggiamento, riducendo lentamente l'ampiezza del campo elettrico del risuonatore anziché smorzarlo bruscamente.

Il fascio di raggi γ così ottenuto viene utilizzato per la sperimentazione dopo avere attraversato collimatori di forma opportuna che ne determinano convenientemente la sezione.

Gli spettri di « bremsstrahlung » dei raggi γ prodotti dal nostro e.s. con vari tipi di bersagli interni (v. Sez. 4, B)) sono stati determinati sperimentalmente per mezzo di uno spettrometro a coppie [11]. I risultati ottenuti sono in buon accordo con le previsioni teoriche [12, 13].

3. — Componenti principali.

La scelta delle caratteristiche definitive dei componenti principali dell'e.s. venne effettuata dopo circa 18 mesi di studio.

Le principali difficoltà incontrate in questa fase furono dovute, oltre alla intrinseca complessità di progettare i componenti di una macchina di prestazioni alquanto avanzate, alla necessità di trovare un ragionevole equilibrio tra l'aspirazione di realizzare una macchina efficiente di sicuro funzionamento e i limiti imposti da considerazioni economiche. Nella progettazione e nella realizzazione della macchina si è inoltre cercato di collaborare con industrie principalmente italiane non solo per ovvie ragioni di comodità ma anche per suscitare, nel nostro paese, interessi e competenze nel campo della fisica delle particelle elementari di alta energia.

A) *Magnete.*

La proiezione verticale, e la sezione radiale del magnete dell'e.s. sono mostrate nelle Fig. I.I.4, I.I.5 dove sono altresì indicate le dimensioni principali. La forma a C del magnete con l'apertura rivolta verso l'esterno della macchina è stata scelta non solo per consentire la produzione di fasci di raggi γ in qualunque punto del perimetro della macchina ma anche per facilitare l'installazione della ciambella (v. Sez. 3, F) e Parte IV) e le operazioni di controllo, messa a punto e manutenzione dell'e.s.

Le dimensioni e la forma dei poli sono state fissate cercando di ridurre entro limiti ragionevoli la perdita di elettroni, inizialmente immessi nella camera a vuoto, nel corso delle fasi di iniezione e di accelerazione. In pratica si è riusciti a ridurre questa perdita a circa il 90% degli elettroni iniettati come del resto la teoria lascia prevedere [1]. Il profilo dei poli deve produrre sul piano mediano del traferro, per le ragioni dette nella Sez. 2, una distribuzione radiale del-

l'induzione magnetica corrispondente ad un valore $n = 0.61$. Le ragioni di questa scelta sono trattate nella Parte II.

Tale distribuzione deve poi rimanere invariata per tutta la durata del ciclo di accelerazione, cioè dal valore del campo di iniezione fino al campo max corrispondente all'energia finale degli elettroni.

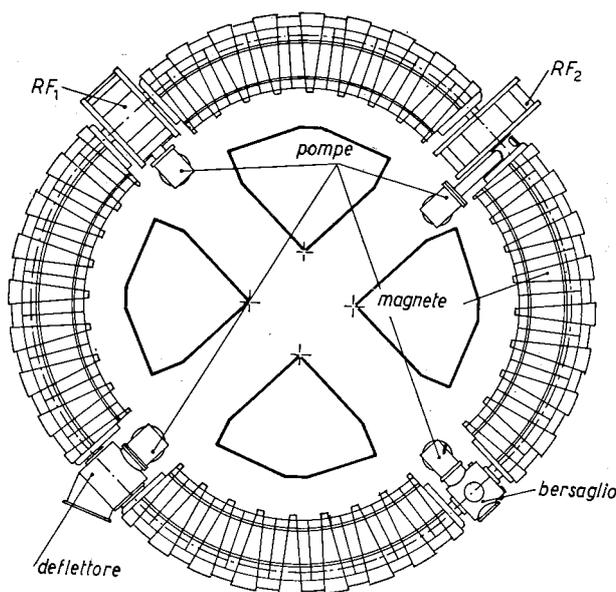


Fig. I.1.4. - Pianta del magnete.

Il magnete (Fig. I.1.4) è diviso in quattro quadranti, ciascuno di 90° di apertura e raggio medio $R_0 = 360$ cm, i cui estremi contigui distano tra loro di $L = 120.6$ cm.

Il ferro che lo costituisce è suddiviso in 64 blocchi (16 blocchi per quadrante) ciascuno del peso di circa 1.4 t per un peso complessivo di circa 100 t. Ciascun blocco è costituito di circa 900 lamierini di ferro-silicio isolati tra loro e impaccati in modo analogo a quello adottato per i nuclei dei trasformatori onde evitare il sorgere di apprezzabili correnti indotte. I blocchi poggiano su viti calanti che ne permettono un accurato livellamento sulla incastellatura di sostegno ancorata al basamento di calcestruzzo.

Gli spazi tra i quadranti (sezioni diritte) sono utilizzati per l'installazione di quattro attacchi alla ciambella dell'impianto di pompaggio per l'alto vuoto, delle cavità a radiofrequenza acceleratrici, e delle lente deflettrici per l'iniezione degli elettroni, oltre ad altri apparati ausiliari (Fig. I.1.4).

Tra le espansioni polari sono disposte delle bobine ausiliarie, aventi lo scopo

di correggere le disuniformità del campo magnetico (v. Sez. 3, *G*) e Parte III, Cap. VIII).

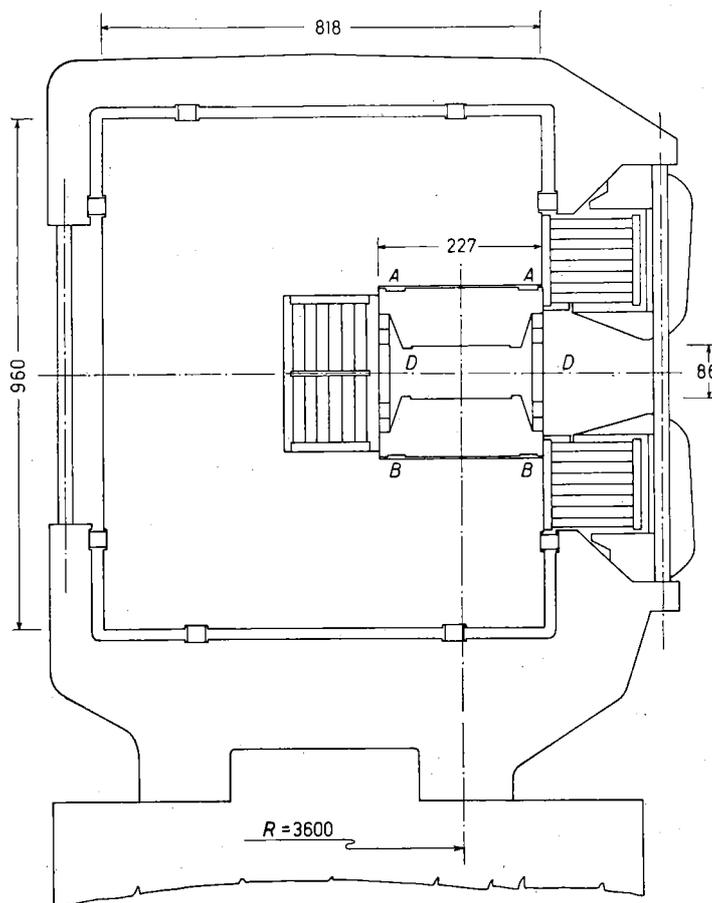


Fig. I.1.5. - Sezione radiale del magnete.

Le quattro bobine principali di eccitazione del magnete (una per ciascun quadrante) sono disposte come mostrato in Fig. I.1.5. La parte di tali bobine che è appoggiata alla finestra interna del C è costituita da 12 spire di conduttore di rame composte da 42 piattine trasposte (per diminuire le correnti parassite) e raffreddate da due guaine di rame connesse a due tubazioni in cui viene fatta circolare, durante il funzionamento, l'acqua di raffreddamento. Le bobine, che per il resto sono costituite da barre di rame forate, sono assicurate al ferro del magnete mediante un sistema di graffe e di tiranti che ne impediscono le vibrazioni.

Come è indicato dalla Fig. I.1.5, le espansioni polari sono meccanicamente separate dal C del magnete onde permettere l'installazione delle bobine. Il sistema di fissaggio delle espansioni è il seguente.

Tra l'espansione polare superiore e il C del magnete è interposto un foglio di materiale isolante rigido mentre l'espansione polare inferiore poggia su un sottile strato di gomma. Questa disposizione consente un comodo e accurato allineamento dei profili polari.

Nelle due cave del polo superiore contrassegnate con la lettera *A* nella Fig. I.1.5 è inserita una guarnizione di gomma, mentre nelle due cave analoghe del polo inferiore (contrassegnate con *B*) è posta una guarnizione di bakelite.

I distanziatori *D* costituiti da colonnine di steatite lavorate con alta precisione vengono inseriti forzando le espansioni polari contro le ali del C del magnete. La reazione elastica delle guarnizioni poste nelle cave *A* e *B* è tale da garantire il contatto delle espansioni polari sui distanziatori vincendo anche le forze tendenti ad attrarre i poli verso il C.

Ricordiamo che questo metodo di montaggio delle espansioni polari è stato a noi suggerito da analoga soluzione impiegata per l'e.s. dell'Università di Cornell, Ithaca, N. Y. [14].

Il profilo dei poli, la disposizione delle bobine principali e di correzione e gli altri dettagli costruttivi del magnete sono stati fissati dopo studi eseguiti prima su modelli di dimensioni ridotte del magnete (scala 1:2, 3) e poi su una sezione del magnete definitivo di circa un metro di sviluppo azimutale (v. Parte III, Cap. V). Effetti di saturazione del ferro del magnete cominciano a manifestarsi quando il campo nell'intraferro è circa 10 000 G.

Nella Parte III, Cap. I sono raccolte maggiori informazioni e i dettagli relativi al magnete.

B) Alimentazione del magnete.

L'alimentazione del magnete deve fornire alle bobine principali una corrente variabile nel tempo con un'intensità crescente da un valore negativo ad un valore massimo positivo (Fig. I.1.6) da cui dipende l'energia massima alla quale vengono accelerati gli elettroni. L'andamento temporale di questa corrente (sinusoidale a 20 Hz con polarizzazione di c.c.) viene ottenuto con il circuito il cui schema di principio è mostrato in Fig. I.1.7.

La dinamo *D* fornisce la corrente continua necessaria a polarizzare la corrente alternata sinusoidale nel magnete.

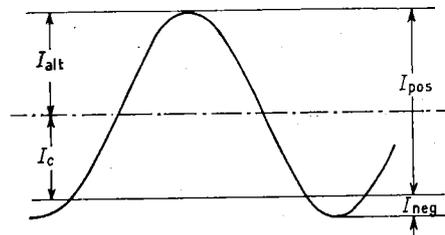


Fig. I.1.6. - Caratteristiche della corrente di eccitazione

L'alternatore A fornisce la potenza in alternata dissipata nel circuito risonante composto dal banco di condensatori C , dalle bobine principali dell'elettrosincrotrone e dalle due impedenze di blocco Z_1 e Z_2 . Queste ultime evitano che la tensione alternata ai capi dell'avvolgimento del magnete venga cortocircuitata dalla dinamo D , che fornisce la corrente continua I_c la quale, passando attraverso le impedenze di blocco Z_1 e Z_2 , va a circolare nelle bobine del magnete.

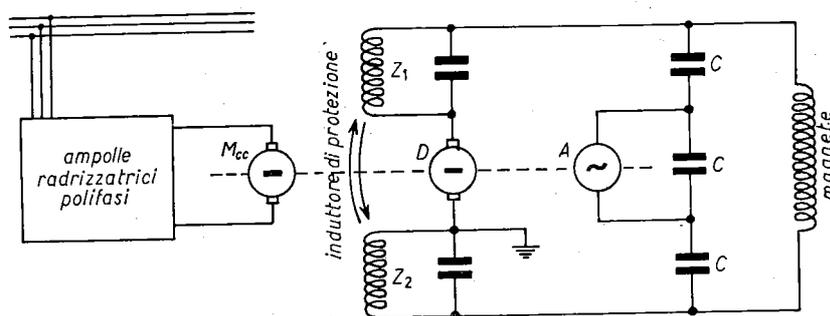


Fig. I.1.7. - Circuito di alimentazione del magnete.

Per assicurare un buon funzionamento dell'e.s. l'alimentazione è stabilizzata in modo da fornire (Fig. I.1.6) una corrente I_{pos} costante nel tempo entro il 2‰ e una I_{neg} entro il (2÷3)‰. Questo grado di stabilizzazione è ottenuto con un sistema di regolazione che consente di stabilizzare la I_{alt} entro 1‰, mentre la I_c segue le variazioni della I_{alt} entro il suo campo di variabilità del 1‰ in modo da stabilizzare la I_{neg} entro il (2÷3)‰. Si ottiene così il risultato complessivo prima indicato.

L'impianto di alimentazione comprende un trasformatore trifase-esafase che alimenta due ampole raddrizzatrici polifasi a vapori di mercurio. La corrente raddrizzata alimenta a sua volta il motore in c.c. M_{cc} che fornisce il movimento di rotazione all'alternatore A (monofase a 20 Hz), alla dinamo D e ad un alternatore trifase a 60 Hz. Separato è il gruppo ausiliario con tutte le eccitatrici e l'alternatore a 1000 Hz per l'alimentazione degli amplificatori magnetici di regolazione. Quest'ultima è infatti realizzata servendosi di amplificatori magnetici.

Maggiori particolari relativi a questo impianto si trovano nella Parte III, Cap. VII.

C) Controlli e comandi.

1) Per il funzionamento dell'e.s. sono necessari degli organi di comando che durante ogni ciclo di accelerazione pongano in azione i vari dispositivi

(iniettore, impianti di radiofrequenza ecc.) ai tempi e con la modalità più convenienti per accelerare all'energia massima il più elevato numero di elettroni. Poichè gran parte di queste operazioni debbono avvenire in tempi brevi rispetto al periodo di accelerazione (~ 23 ms) è ovvio che solo apparati elettronici possono venire efficacemente impiegati a questo scopo.

Accanto a questi organi che costituiscono il così detto «sincronizzatore principale» si aggiungono numerosi apparati che controllano il corretto funzionamento delle componenti principali della macchina e dei servizi ausiliari. Il sincronizzatore principale, i controlli di funzionamento e gran parte degli alimentatori della RF_1 e RF_2 , sono alloggiati in sala controllo (Fig. I.1.8). Tali apparati sono installati su una quarantina di armadi rack.

I comandi dei parametri principali del sincronizzatore suddetto trovano posto in un tavolo centralizzato di controllo insieme agli altri comandi e a due oscillografi che permettano all'operatore dell'elettrosincrotrone che siede a questo tavolo di osservare gli impulsi di tensione forniti dai vari apparati elettronici.

2) *Sincronizzatore principale.* - La successione nel tempo degli impulsi di comando e delle operazioni principali che si ripetono ad ogni ciclo di funzionamento dell'e.s. (quindi 20 volte al secondo) è quella descritta nella Tabella I che è valida per l'accelerazione di elettroni all'energia massima di 1 GeV con una energia cinetica di iniezione di 2.5 MeV (ciclo magnetico con le caratteristiche seguenti: $B_{\max} = 9260$ G, $B_{\min} = -144$ G).

L'ordine logico delle operazioni da compiere ad ogni ciclo di accelerazione viene stabilito ricavando la serie delle informazioni necessarie dal valore temporale del campo magnetico, che viene assunto come variabile indipendente. L'informazione dal campo magnetico è di tipo discontinuo e viene fornita da apposite apparecchiature comunemente denominate «peakers» o «peaking strips». Il funzionamento di questi rivelatori può essere descritto come segue.

Le peakers, costituite essenzialmente da fili sottili di materiale ferromagnetico di elevata permeabilità disposti nel campo disperso del magnete, forniscono impulsi di tensione ai terminali di un avvolgimento pick-up in corrispondenza di ogni inversione del verso del campo magnetico nel quale esse si trovano immerse. La regolazione della corrente nel solenoide di polarizzazione che circonda il filo permette di ottenere impulsi in corrispondenza di valori prefissati del campo (v. Parte III, Cap. IV).

La peaker I fornisce un impulso molto prima dell'istante in cui il campo è nullo. Questo impulso serve a comandare la partenza di un'onda squadrata di corrente che viene inviata nei circuiti di correzione del campo nel trasferimento del magnete (v. Parte III, Cap. VIII).

L'impulso di tensione della peaker II comanda, attraverso un circuito a ritardo variabile, l'impulsatore della sorgente dell'iniettore. Tale impulsatore

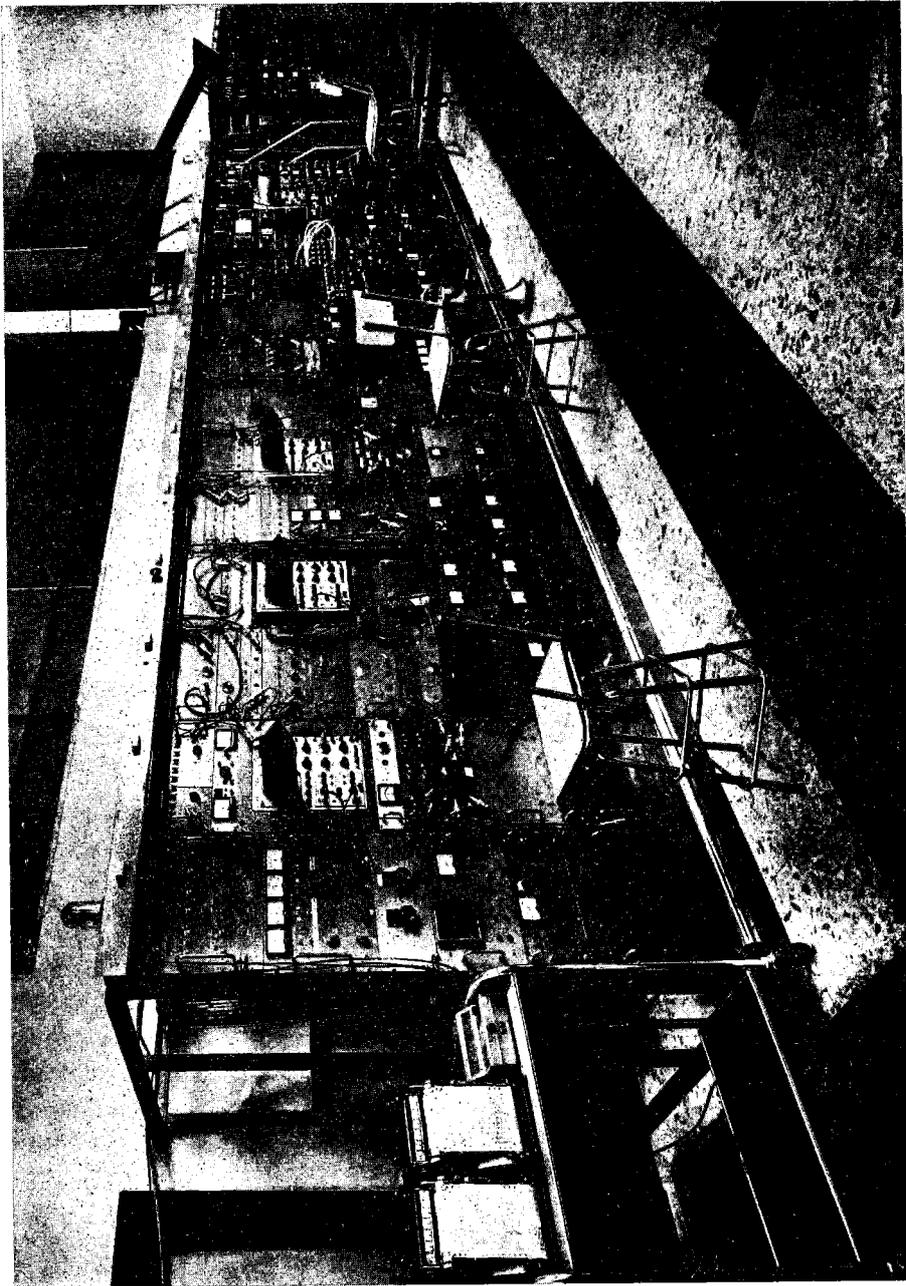


Fig. I.1.8. - Sala di controllo dell'elettrosincrotrone.

fornisce un'onda rettangolare di tensione della durata di $2 \mu s$, la quale innalza il potenziale della griglia di controllo della sorgente consentendo l'immissione degli elettroni nel tubo acceleratore. Lo stesso impulso della peaker II comanda inoltre, attraverso un altro circuito a ritardo variabile, il modulatore di ampiezza della RF_1 . Questo a sua volta comanda l'ampiezza della tensione a radiofrequenza nella prima cavità. Le caratteristiche (aggiustabili) dell'impulso modulante sono definite dai parametri stessi del modulatore.

Nonostante l'asservimento della corrente di polarizzazione della peaker II alla tensione acceleratrice del Van de Graaff (v. Sez. 3, D) il ritardo tra l'inizio dell'iniezione e l'inizio dell'accelerazione si mantiene costante di modo che pure la durata dell'iniezione stessa resti costante ad ogni ciclo.

L'impulso fornito dalla peaker III sblocca un circuito che fornisce un impulso di tensione avente una forma opportuna. Tale impulso modula attraverso un tubo a reattanza la frequenza dell'oscillatore pilota di tutto l'impianto. La particolare forma di modulazione scelta differisce sensibilmente da quella teoricamente migliore; in particolare è stato necessario avvicinarsi rapidamente alla frequenza finale. Ciò equivale a cambiare la legge di modulazione verso la fine del ciclo a frequenza variabile per evitare che il fascio elettronico circolante nella macchina ecciti la cavità RF_2 e venga così ridotto in intensità a causa delle forti oscillazioni di sincrotrone innescate conseguentemente.

Le operazioni 9, 13, 14 della Tabella I sono compiute da un unico circuito che fornisce sia un impulso rettangolare che « accende » la RF_1 consentendole di eccitare la prima cavità per tutta la sua durata, sia un impulso che inizia la più complessa operazione di modulazione di ampiezza della catena RF_2 . Le forme d'onda degli impulsi modulanti in ampiezza e frequenza le tensioni sviluppate nelle cavità acceleratrici sono riportate nei Cap. II e III della Parte V. Particolare cura è posta nella formazione dell'ultima parte dell'impulso di modulazione della RF_2 . Dalle modalità della diminuzione della tensione acceleratrice nella cavità RF_2 dipende infatti la durata del fascio di raggi γ utilizzati esternamente per il lavoro sperimentale.

Una descrizione particolareggiata del sincronizzatore è data nella Parte VII Cap. II.

D) *Iniettore ed ottica di iniezione.*

1) *L'iniettore.* - L'iniettore dell'e.s. ha lo scopo di preaccelerare gli elettroni che vengono immessi, all'inizio di ogni ciclo di accelerazione, nella camera a vuoto posta tra le espansioni polari del magnete. Ciò viene fatto con il duplice intento di evitare l'iniezione in un campo magnetico di valore troppo basso e di ridurre l'ampiezza dei limiti di modulazione della radiofrequenza acceleratrice. Infatti un valore troppo basso del campo magnetico di iniezione determina serie difficoltà per l'esecuzione di misure magnetiche accurate aventi lo

TABELLA I

No.	Successione degli impulsi di comando e delle operazioni principali in un ciclo	Tempo t (**) (μ s)
1	Impulso peaker I (con polarizzazione fissa) per comando alimentatori circuiti di correzione del campo magnetico.	<u>$t_1 = 1500$</u>
2	Inizio impulso di corrente nei circuiti di correzione. Durata dell'impulso 2000 μ s. (<i>Accensione delle correnti di correzione.</i>)	$t_2 = t_1 + \Delta t_1$
3	Inversione del verso del campo magnetico nel traferro ($B_0 = 0$).	<u>$t_3 = 1975$</u>
4	Impulso peaker II (con polarizzazione modulata) per comando impulsatore Van de Graaff e modulatore ampiezza RF_1 .	<u>$t_4 = 2140$</u>
5	Impulso peaker III (con polarizzazione fissa) per comando modulazione di frequenza RF_1 .	<u>$t_5 = 2150$</u>
6	<i>Inizio modulazione di frequenza.</i> Durata 300 μ s.	$t_6 = t_5 + \Delta t_5$
7	Inizio impulso di tensione sulla griglia della sorgente del Van de Graaff. Durata 2 μ s. (<i>Inizio funzionamento iniettore e iniezione.</i>)	$t_7 = t_4 + 15$
8	Passaggio del campo magnetico per il valore $B_0 = B_{0\text{iniez}}$ che corrisponde all'energia cinetica di iniezione nominale (2.5 MeV).	<u>$t_8 = 2155$</u>
9	Inizio impulso di tensione fornito dal modulatore di ampiezza della RF_1 . (<i>Accensione cavità RF_1 ed inizio accelerazione.</i>)	$t_9 = t_7 + 1.5$
10	Fine impulso (iniziato in 7) sulla griglia della sorgente del Van de Graaff. (<i>Fine funzionamento iniettore.</i>)	$t_{10} = t_7 + 2$
11	<i>Fine della modulazione di frequenza.</i>	<u>$t_{11} = t_6 + 300$</u>
12	Fine impulso di corrente (iniziato in 2) nei circuiti di correzione. (<i>Spegnimento correzioni del campo magnetico.</i>)	$t_{12} = t_2 + 2000$
13	Accensione RF_2 .	$t_{13} = t_9 + 1500$
14	Fine dell'impulso di modulaz. di ampiezza RF_1 . (<i>Spegnimento cavità RF_1.</i>)	$t_{14} = t_9 + 2000$
15	Raggiungimento energia max.	$t_{15} = 25000$
16	<i>Spegnimento RF_2.</i>	$t_{16} = 26500$
—	Uscita fascio γ tra 23500 (≈ 992 G) e 26500 μ s (≈ 992 G). Durata del fascio 3000 μ s.	

(*) I dati sottolineati a tratti sono soggetti a fluttuazioni da ciclo a ciclo per le ragioni esposte nella nota relativa all'operazione no. 4. I dati sottolineati a tratto continuo, restano invece invariati ad ogni ciclo.

(**) L'origine dei tempi, è stata assunta coincidente con il valore minimo del campo magnetico ($B_{0\text{min}} = -144$ G).

I (*).

Campo magnetico B_0 (G)	Energia cinetica elettroni T (MeV)	Comando della operazione	NOTE
<u>-60</u>	—		
<u>-58.5</u>	—	peaker I	Il ritardo Δt_1 , che è dell'ordine di $5 \mu s$, è costante ed è il ritardo proprio della catena elettronica.
<u>0</u>	—		
<u>25.3</u>	—		La modulazione della corrente di polarizzazione viene effettuata per compensare le variazioni rapide della tensione del V.d.G. Per conseguenza il valore del campo al quale la peaker fornisce l'impulso e l'istante corrispondente fluttuano entro il $(0.5 \div 1)\%$.
<u>26.5</u>	—		
<u>27</u>	—	peaker III	Il ritardo Δt_2 , che è dell'ordine di $(2 \div 4) \mu s$ è costante ed è il ritardo proprio della catena elettronica.
<u>27.4</u>	2.5	peaker II	Il ritardo tra l'impulso 4 e l'operazione 7 è, entro certi limiti, variabile a piacere.
<u>27.4</u>	2.5		
<u>27.7</u>	2.5	peaker II	Il ritardo tra l'impulso 4 e l'operazione 9 è, entro certi limiti, variabile a piacere.
<u>27.8</u>	2.5		
<u>~78</u>	7.9		
<u>304</u>	32.3		
<u>343</u>	36.5		
<u>454</u>	48.5		
<u>9260</u>	1000		
<u>9176</u>	992		

Nota. - I dati della presente tabella si riferiscono ad una particolare condizione di funzionamento della macchina, condizione precisata nella Sezione 5, B), 2). Tali dati, oltre che variare con l'energia massima degli elettroni, sono soggetti a ritocchi nella continua ricerca delle condizioni ottime di funzionamento dell'elettrosincrotrone.

scopo di controllare che la distribuzione radiale del campo stesso sia quella prescritta per la focalizzazione del fascio elettronico. Inoltre, una modulazione di frequenza del campo elettrico acceleratore entro ampi limiti è in generale difficilmente conciliabile con la elevata velocità della modulazione medesima, quale è richiesta dalla rapida salita del campo magnetico.

L'iniettore da noi montato sull'e.s. è un acceleratore elettrostatico del tipo Van de Graaff [15, 16], di tipo commerciale (tipo KS, 3 MeV della « High Voltage Engineering Corporation » Cambridge, Mass.), capace di fornire una tensione acceleratrice max di 3 milioni di volt ed una corrente continua di elettroni di 1 mA (Fig. I.I.1). Le variazioni della tensione di accelerazione dichiarate dal costruttore sono entro $\pm 1\%$ ad una frequenza fondamentale di 5 Hz.

Al fine di avere un'efficace iniezione è necessario disporre di impulsi di corrente della durata di $2 \mu\text{s}$ con la frequenza di ripetizione dell'e.s., ed aventi un'intensità max di $(50 \div 100)$ mA. È inoltre necessario che l'energia degli elettroni resti stabile nel tempo entro lo 0.1% , mentre il fascio uscente dal tubo acceleratore deve avere un diametro non superiore a 2 cm con una divergenza non superiore a 10^{-3} rad.

È stato quindi indispensabile apportare alcune modifiche al Van de Graaff acquistato al fine di renderlo soddisfacente alle richieste sopradette. Tali modifiche consistono sostanzialmente in:

a) Realizzazione di una nuova sorgente di elettroni di elevata intensità, e del relativo impulsatore. A questo scopo è stato cambiato il catodo originale ed è stata montata una sorgente tipo Pierce [17].

b) Si è realizzato uno stabilizzatore di tensione atto a ridurre le fluttuazioni della tensione acceleratrice dal $\pm 1\%$ al $\pm 1\%$. Questo stabilizzatore agisce solo stabilizzando le variazioni lente della tensione (fino a 5 Hz).

c) È stato infine studiato e costruito un dispositivo atto a compensare le variazioni rapide della tensione acceleratrice sia modulando la tensione del deflettore elettrostatico, sia agendo sulla polarizzazione della peaker posta nel campo magnetico che comanda l'impulsatore della sorgente. In questo ultimo modo si varia convenientemente l'istante di iniezione degli elettroni.

Maggiori dettagli sulle modifiche apportate all'iniettore sono fornite nella Parte VI, Cap. I.

2) *L'ottica di iniezione.* — Per effetto di cause diverse e concomitanti il fascio di elettroni emesso da un acceleratore elettrostatico risulta essere divergente (v. Parte VI, Cap. II).

D'altra parte perchè il sincrotrone accetti nella fase d'iniezione un elevato numero di elettroni è necessario che questi vi siano immessi in un fascio prati-

camente parallelo (nel piano orizzontale la divergenza angolare deve essere inferiore a $3 \cdot 10^{-3}$ rad con una larghezza inferiore a 5 mm).

Vi è inoltre l'esigenza di mantenere la tank dell'iniettore sufficientemente distante dal magnete per non perturbare l'andamento del campo focalizzante nel traferro.

Per ottenere ciò si suole disporre l'iniettore in modo che l'asse del fascetto elettronico emesso formi un certo angolo rispetto alla tangente all'orbita principale nel punto di iniezione. Si usa poi un sistema elettrostatico o magnetico di deflessione per curvare le traiettorie degli elettroni di un angolo pari a quello suddetto. Si rende quindi necessario disporre di un sistema di lenti focalizzatrici e deflettrici che soddisfi alle richieste suddette.

Sull'e.s. è installato un deflettore elettrostatico costituito da un settore di condensatore cilindrico con raggio medio di curvatura 80 cm ed apertura 60° . La tensione tra le 2 armature è regolabile tra 30 e 50 kV secondo l'energia cinetica degli elettroni iniettati. Esso è dotato di 6 gradi di libertà realizzati con meccanismi sotto vuoto telecomandati a distanza. Il collegamento tra la scatola contenente il deflettore ed il prolungamento del tubo acceleratore è realizzato con un raccordo mobile a tenuta di vuoto che permette l'allineamento delle 2 parti.

Sul suddetto prolungamento del tubo acceleratore è installato il sistema di focalizzazione costituito da una lente magnetica a simmetria assiale e da un quadrupolo magnetico. Ora il deflettore elettrostatico si comporta come una lente cilindrica convergente nel piano orizzontale e senza effetto in quello verticale, mentre sappiamo che il fascio emesso dall'iniettore è divergente su entrambi questi piani.

È necessario pertanto che il sistema delle 2 lenti suddette focalizzi orizzontalmente il fascio nel fuoco-oggetto del deflettore, e che fornisca all'uscita, nel piano verticale, un fascio parallelo. Tra queste due lenti focalizzatrici ed il deflettore sono poste infine 2 coppie di bobine per la deflessione orizzontale e verticale del fascio elettronico, necessaria quando la bocca d'entrata del deflettore viene spostata.

E) Gli impianti a radiofrequenza.

Come si è già accennato, l'accelerazione degli elettroni dopo l'iniezione nella ciambella dell'e.s. è affidata a due cavità a radiofrequenza, una (Fig. I.1.9) a bassa potenza e modulata in frequenza (RF_1), l'altra a frequenza fissa e potenza elevata (RF_2). L'impiego di due cavità di caratteristiche così diverse è consigliato dalla notevole variazione ($\sim 1.5\%$) della velocità di rotazione degli elettroni nella prima parte del ciclo di accelerazione, quando per altro non occorrono campi elettrici acceleranti particolarmente elevati. Quando gli elettroni hanno raggiunto una energia superiore a circa 10 MeV la loro velocità

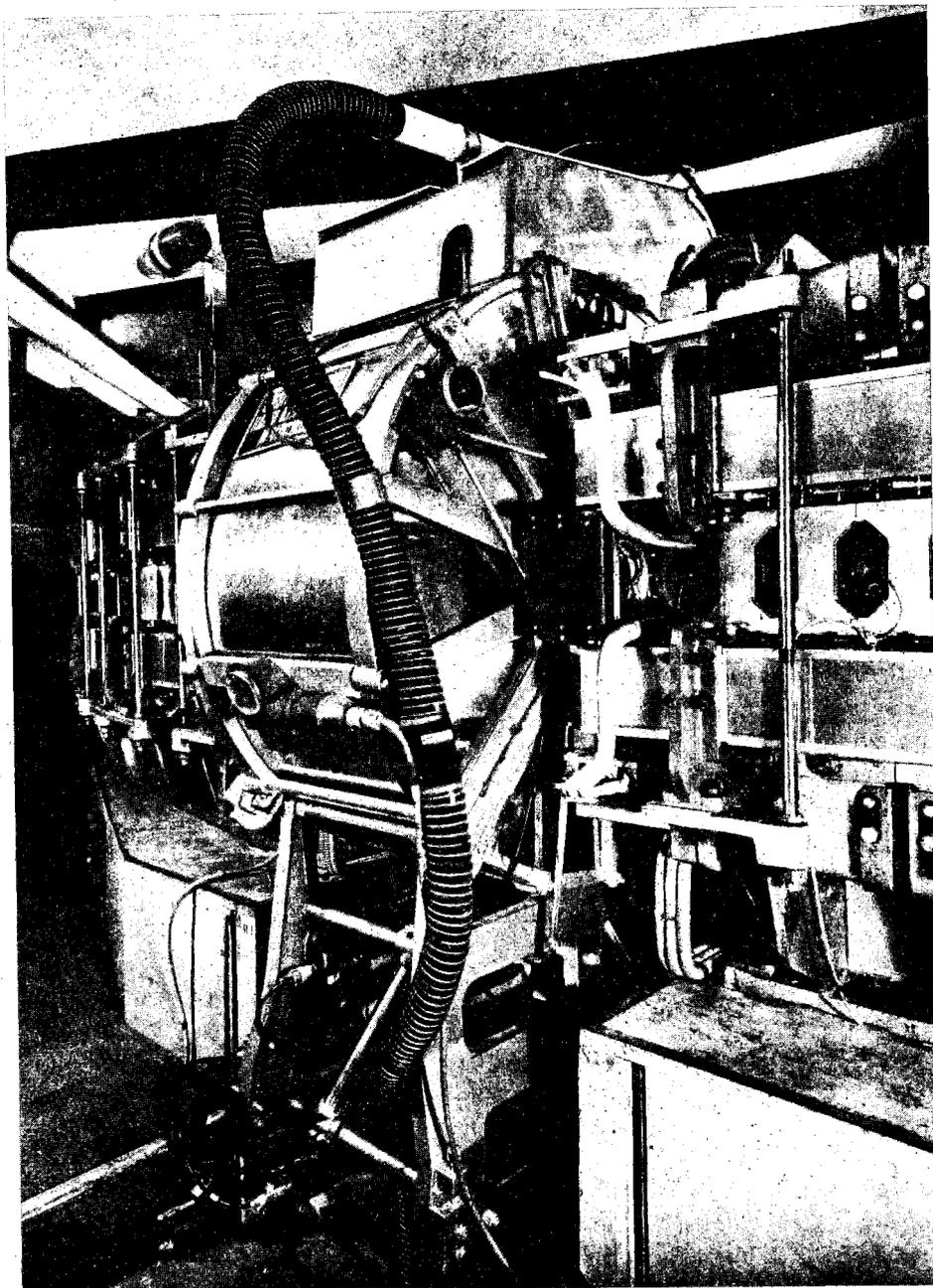


Fig. I.1.9. - Cavità RF_1 montata sull'elettrosincrotrone.

diviene praticamente costante e risulta per altro conveniente disporre di d.d.p. acceleranti assai elevate ($(10 \div 70)$ kV) onde compensare le perdite di energia per irraggiamento che gli elettroni subiscono in misura sempre maggiore al crescere della loro energia. Considerando che le prestazioni dell'impianto a RF nella prima e nella seconda parte del ciclo di accelerazione sono molto diverse, si è preferito costruire due dispositivi separati (RF_1 e RF_2).

L'impianto RF_1 presenta pertanto le seguenti principali caratteristiche:

1) La modulazione della frequenza di lavoro dell'impianto è abitualmente di circa l'1.5% (estensibile fino al 2.5%) su un intervallo di frequenza da circa 43.1 a circa 43.7 MHz. Con un impulso di tensione di forma adatta si comanda un tubo di reattanza che fornisce una tensione a frequenza variabile nel tempo con la legge desiderata. Con tale tensione si pilota una catena amplificatrice a radiofrequenza. Lo stadio finale di questa catena è montato sulla stessa cavità RF_1 (per maggiori dettagli v. Parte V, Cap. I).

2) La modulazione d'ampiezza è assai rapida poichè il tempo necessario per passare dalle condizioni in cui la d.d.p. in cavità è trascurabile a quella in cui la d.d.p. è di circa 3 kV risulta inferiore a $1 \mu s$. La tensione di picco massima ottenibile nella cavità RF_1 è di ~ 7 kV.

L'impianto RF_2 presenta le seguenti principali caratteristiche:

1) Frequenza di funzionamento fissa a 43.7 MHz ($\pm 0.5\%$).

2) La d.d.p. di cresta massima di cavità è ~ 80 kV.

La d.d.p. in cavità è modulata in ampiezza durante il ciclo di accelerazione. L'andamento di tale modulazione è descritto nella Parte V, Cap. II.

La cavità RF_2 è costituita da 2 parti separabili delle quali la parte gap, che è completamente sotto vuoto, è rinchiusa in un cilindro di quarzo del diametro di ~ 500 mm; il rimanente della cavità è in aria per permettere un più comodo accoppiamento all'amplificatore terminale.

Tutte le parti di questi impianti sono state costruite in questi Laboratori.

F) Impianto di vuoto e ciambella.

Accenneremo qui brevemente alla camera a vuoto a forma toroidale, comunemente chiamata ciambella, entro la quale circolano gli elettroni.

La ciambella deve essere internamente conduttrice in modo che non si accumulino sulle sue pareti interne cariche elettroniche che potrebbero perturbare il fascio di elettroni deviandolo dalla sua traiettoria.

Per un buon rendimento della macchina si richiede che la pressione residua sia inferiore a $5 \cdot 10^{-6}$ mm Hg.

All'inizio dell'attività per la costruzione della ciambella, si era presa in

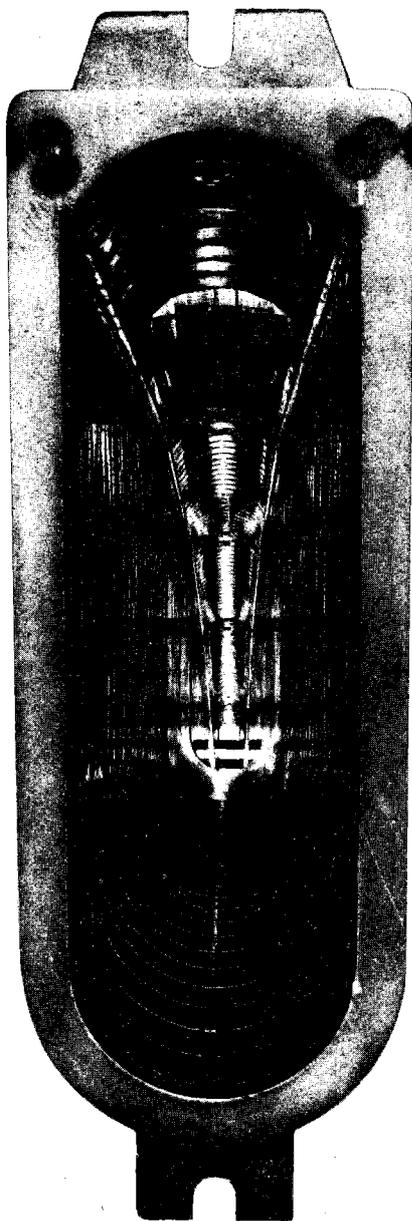


Fig. I.1.10. - Vista della ciambella. Inizio di un settore ed interno.

considerazione la possibilità di una costruzione con diversi materiali e particolarmente con acciaio inossidabile, porcellana, quarzo e pyrex.

La soluzione in acciaio inossidabile fu scartata in sede di progetto, perchè risultò che i campi indotti da correnti di Foucault nell'acciaio avrebbero variato sensibilmente l'indice n nel campo magnetico. Furono presi contatti con ditte specializzate per una realizzazione della ciambella in quarzo o porcellana e si dovette scartare anche tale soluzione per le difficoltà incontrate dalle ditte a realizzare dei tubi della forme e delle caratteristiche meccaniche da noi richieste. Pertanto, dopo vari tentativi nel settembre 1956 si iniziò a studiare la possibilità di realizzare la ciambella in araldite e quarzo. Si arrivò così alla definizione del progetto di cui qui sotto si descrivono brevemente i dati costruttivi principali [18].

La ciambella (Fig. I.I.10) ha le seguenti dimensioni: lunghezza sull'orbita d'equilibrio degli elettroni 27 440 mm, sezione (77×212) mm², spessore della parete 10 mm.

Per la sua costruzione si è adoperato un miscuglio di araldite tipo B e polvere di quarzo, mentre la metallizzazione interna è realizzata con strisce sottili di acciaio inossidabile amagnetico. La tenuta di vuoto tra i vari settori che costituiscono la camera a vuoto (3 per quadrante) è assicurata da guarnizioni di neoprene tipo OR alloggiare in scanalature ricavate sulla testata dei settori. Il collegamento è fatto tramite tiranti che hanno la loro sede in orecchie saldate su ogni testata da congiungere. Sulla parete laterale esterna dei quadranti di ciambella sono praticate delle aperture rettangolari contigue. Come è mostrato in Fig. I.I.11, l'apertura è chiusa da una lastra di vetro. Lo scopo di questa apertura è di permettere dall'esterno la visione dell'interno della ciambella e in particolare delle bandierine fluorescenti. Ciascuna di tale bandierine viene utilizzata per la ricerca del fascio (v. Sez. 4, A).

L'impianto di vuoto è composto di 4 gruppi indipendenti collegati alla ciambella nelle sezioni diritte. Ogni gruppo comprende una pompa a diffusione di olio della portata di 3 000 l/s, una tasca refrigerata a -30 °C e una valvola a contropressione che elimina il pericolo di rientro d'aria nella ciambella qualora, per un guasto del gruppo di vuoto, potesse rientrare aria nella pompa a diffusione. L'impianto è stato eseguito dalle Officine Galileo.

Ciascun gruppo di vuoto è azionato elettricamente da un centralino di comando.

Il meccanismo di comando è concepito in modo che il susseguirsi delle operazioni per la messa in funzione dei vari gruppi può essere completamente automatico o manuale, ed in ciascuno dei casi è reso obbligatorio da un sistema di asservimento di ciascun comando a quello che deve procederlo.

Automatismi di avviso e sicurezza assicurano contro gli inconvenienti possibili, provvedendo all'esclusione e segnalazione del guasto.

La misura del vuoto è fatta da vacuometri a ionizzazione le cui teste di

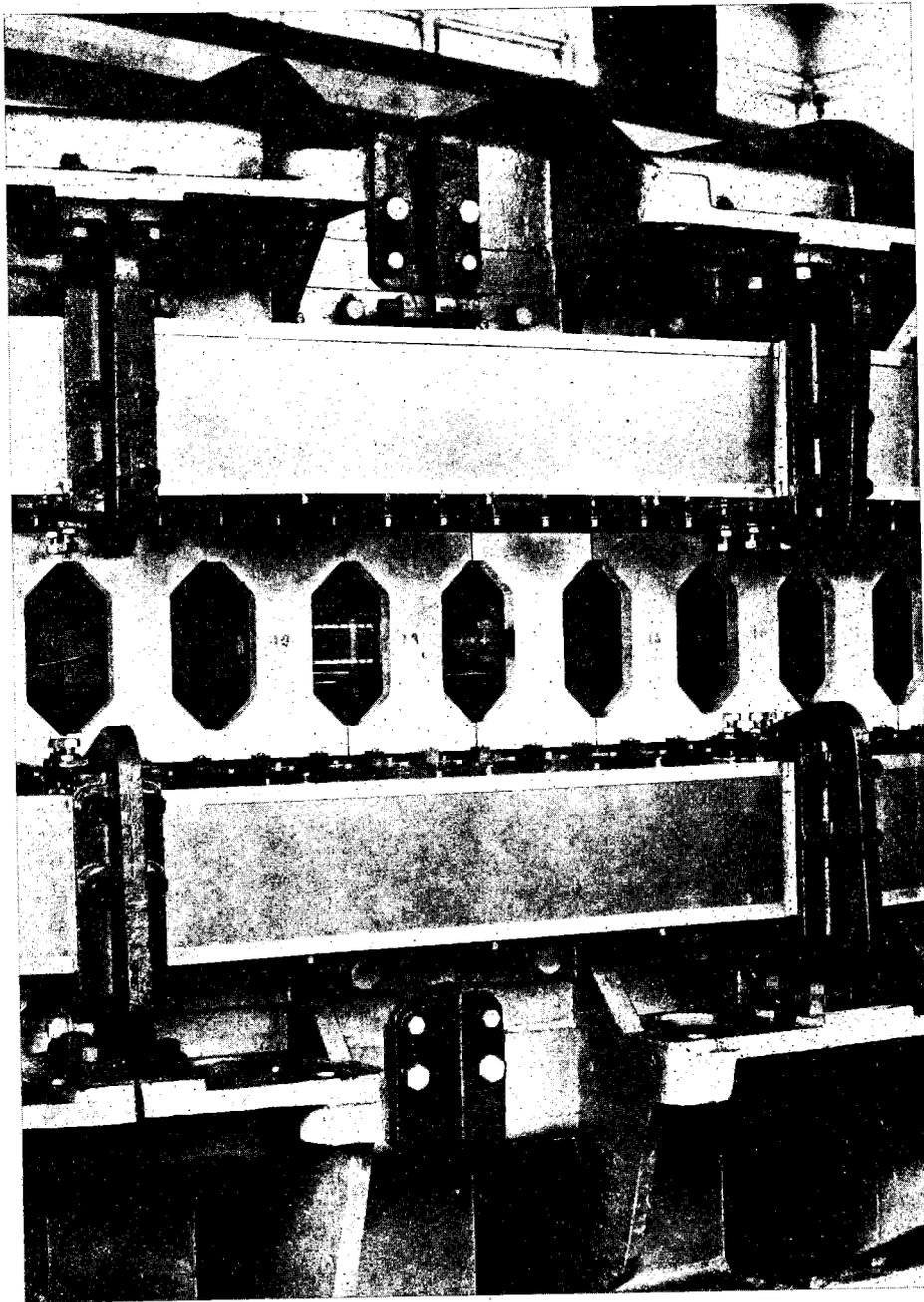


Fig. I.I.11. - Vista frontale della ciambella in sito nel traferro del magnete. Sono visibili le finestre per l'osservazione delle bandierine fluorescenti.

misura sono collocate sulle sezioni diritte. Una descrizione maggiormente dettagliata della ciambella e dell'impianto trovasi nella Parte IV.

G) Avvolgimenti di correzione.

Come già detto il campo magnetico sul piano mediano nel traferro durante le fasi di iniezione e di accelerazione deve seguire con precisione la legge

$$B_z(r, t) = B_0(t) \left(\frac{R_0}{r} \right)^n, \quad (R_0 = 360 \text{ cm}; n = 0.61),$$

ciò è particolarmente necessario a basso valore del campo, quando gli elettroni, appena iniettati, occupano la massima parte della ciambella. D'altra parte proprio a bassi valori del campo magnetico più forti sono gli effetti che ne perturbano l'andamento (campo rimanente, campi dovuti a correnti parassite, nel rame e nel ferro, disomogeneità azimutali del ferro, ecc.). Si devono quindi predisporre degli avvolgimenti ausiliari sotto le espansioni polari, sulla gamba di ritorno del magnete ed alle testate dei quadranti, in modo che la corrente in essi circolante, che ammonta a piccole frazioni della corrente totale, permetta delle correzioni locali almeno durante un certo intervallo del ciclo di eccitazione del campo magnetico nel traferro. (Per uno studio particolareggiato v. Parte III, Cap. VIII.)

Le correnti per gli avvolgimenti ausiliari sono fornite da alimentatori a tubi elettronici.

Gli avvolgimenti ausiliari consistono di circa 200 fili posti sull'espansioni polari e sulla gamba di ritorno del magnete: gli alimentatori contano circa 200 tubi elettronici.

Come già detto, compito di questi avvolgimenti è la correzione dell'andamento del campo magnetico nel traferro (v. Parte III, Cap. V): in particolare essi servono a correggere i seguenti effetti:

- 1) campo residuo;
- 2) perturbazioni nell'andamento radiale del campo;
- 3) perturbazioni nella posizione del piano mediano magnetico;
- 4) inomogeneità azimutali;
- 5) perturbazioni alle testate dei quadranti.

Altri possibili compiti di questi avvolgimenti sono: il controllo dell'attraversamento del fascio alle sezioni diritte, l'allargamento nella zona utile all'iniezione, ed il controllo dell'estrazione del fascio di elettroni.

4. — Altri componenti.

Oltre ai componenti principali dell'e.s. descritti nei paragrafi precedenti accenneremo ora ad altri componenti che pur essendo essenziali al funzionamento della macchina hanno tuttavia dimensioni e complessità assai minori.

A) *Dispositivi per la ricerca del fascio.*

Nel periodo di studio e aggiustamento dei vari parametri precedente alla definitiva entrata in funzione dell'e.s. vennero apprestati e impiegati numerosi dispositivi intesi ad osservare il comportamento degli elettroni durante il ciclo di accelerazione nell'interno della macchina. Questi dispositivi sono rimasti in buona parte installati per consentire la rapida messa a punto della macchina dopo interruzioni, e per facilitare la ricerca delle cause di eventuali cattivi funzionamenti. I dispositivi destinati a questo scopo sono montati nella ciambella o nelle scatole delle sezioni diritte libere (v. Sez. 3, F^o) e Parte IV), essi si possono distinguere in 2 categorie:

- 1) dispositivi distruttivi del fascio;
- 2) dispositivi non distruttivi.

1) *Dispositivi distruttivi.* — In questa categoria sono compresi quei dispositivi che forniscono informazioni su qualche caratteristica del fascio (posizione, intensità, ecc.) ma che operano al tempo stesso una forte attenuazione o una completa distruzione del fascio stesso.

Questi dispositivi possono venire impiegati ovviamente soltanto per la messa a punto della macchina relativamente ai primi giri degli elettroni dopo l'iniezione.

In questa categoria rientrano:

a) *Bandierine fluorescenti.* Esse consistono di reticelle alquanto fitte di fili metallici o anche piastrine metalliche ricoperte di sostanze fluorescenti (v. Parte VIII, Cap. I). La parte metallica di ogni bandierina è messa a terra per impedire l'accumulo di cariche.

b) *Elettrodi raccoglitori.* Essi vengono impiegati per determinare la carica totale contenuta nel fascio o in una parte di esso che incida sull'elettrodo stesso. Tali dispositivi sono in genere costituiti di una struttura metallica di forma conveniente, connessa a terra con una resistenza di valore opportunamente scelto. L'impulso di tensione che il fascio incidente sull'elettrodo produce ai capi di questa resistenza, può venire amplificato e fornire l'informazione desiderata sull'intensità del fascio stesso (v. Parte VIII, Cap. I).

2) *Dispositivi non distruttivi*. - In questa categoria sono compresi quei dispositivi che forniscono informazioni su qualche caratteristica del fascio (principalmente il numero di elettroni accelerati) senza perturbare in alcun modo il ciclo di accelerazione.

I dispositivi non distruttivi usati sono di due tipi:

a) *Elettrodi a induzione*. Gli elettrodi a induzione sono costituiti in genere da scatole metalliche aperte lungo la direzione secondo la quale vengono attraversati dal fascio di elettroni.

Gli elettroni transitando nell'interno dell'elettrodo inducono su di esso uno impulso di tensione che dipende, tra l'altro, dal loro numero. Tale impulso opportunamente amplificato da una catena di amplificatori rapidi, può ad esempio essere osservato ad un oscillografo. Gli impulsi provenienti da uno di tali elettrodi vengono continuamente osservati dall'operatore durante il funzionamento dell'e.s.

b) *Misuratori di luce irraggiata*. Questo dispositivo, con il quale è possibile ottenere informazioni sul fascio, soprattutto ad alta energia, si basa sul fatto che gli elettroni circolanti in un sincrotrone emettono radiazioni elettromagnetiche secondo uno spettro ben noto che dipende principalmente dall'energia degli elettroni (v. Sez. 2 e Parte II, Sez. 5, B)).

Per tale motivo è stato realizzato un sistema ottico che raccoglie la luce emessa in direzione tangente all'orbita degli elettroni in prossimità della sezione diretta libera. La luce raccolta è stata osservata sia visualmente che per mezzo di fotomoltiplicatori. È ora in corso di approntamento un sistema ottico definitivo.

B) Bersagli interni per produrre il fascio γ .

In vari punti della ciambella sono disposte delle piastrine di tantalio di conveniente spessore che vengono utilizzate per produrre i raggi γ esterni dell'e.s. Tali dispositivi restano aderenti alla parete laterale interna della ciambella se non vengono utilizzati. In caso contrario vengono allontanati dalla parete e messi in posizione con un comando esterno simile a quello utilizzato per le bandierine fluorescenti.

Notizie su questi bersagli interni si danno nella Parte VIII, Cap. II.

A completamento del sintetico racconto da noi fatto diamo ora nella seguente Sez. 5 le caratteristiche di struttura e di funzionamento dell'elettrosincrotrone.

Le caratteristiche riportate sono quelle valide nel luglio 1960.

5. - Caratteristiche attuali e riassunto dei parametri.

A) *Elenco dei parametri caratteristici dell'e.s.*

1) *Magnete.*

— Tipo di focalizzazione scelta:	debole (cioè a gradiente costante).
— Indice del campo magnetico:	0.61.
— No. delle unità magnetiche (apertura 90°):	4.
— No. sezioni diritte:	4.
— Raggio di curvatura dell'orbita principale di un settore:	360 cm.
— Lunghezza di un settore magnetico:	565 cm.
— Lunghezza di una sezione diritta:	120.6 cm.
— Dimensioni del traferro:	(22.7 ± 8.6) cm ² .
— Forma della sezione radiale di un settore:	a C con traferro esterno.
— Tipo di espansioni polari usate e loro montaggio:	poli trapezoidali riportati al C con supporti di steatite.
— Tipo di laminato usato per i ritorni e per i poli:	laminato in acciaio al silicio Armeo Di-Max 19 (spessore 0.35 mm).
— Tipo di assemblaggio dei laminati:	pacchi di lamierini isolati ed incollati con araldite a caldo assemblati meccanicamente.
— Peso totale del ferro:	~ 100 t.
— No. spire della bobina di eccitazione:	12 per quadrante.
— Tipo di raffreddamento:	con circolazione d'acqua.
— Peso complessivo del rame:	10 t.
— Induttanza del magnete:	17.2 mH.
— Campo magnetico di picco sull'orbita principale (1 GeV):	9 260 G.
— Valore di picco dell'energia magnetica immagazzinata nel traferro (1 GeV):	265 000 J.
— Potenza dissipata nel rame e nel ferro a 20 Hz e con eccitazione corrispondente ad 1 GeV:	~ 155 kW.

2) *Alimentazione del magnete.*

— Tipo di circuito usato:	la bobina di eccitazione del magnete è connessa in parallelo ad un banco di condensatori, così da costituire un
---------------------------	---

	circuito <i>LC</i> parallelo risonante a 20 Hz. Il circuito è eccitato da un alternatore sincrono. Una dinamo protetta da un'impedenza di blocco invia nel magnete una componente di corrente continua.
— Frequenza di alimentazione:	20 Hz.
— Forma del ciclo di alimentazione:	corrente alternata, sinusoidale, con componente corrente continua.
— Potenza dell'alternatore:	510 kVA.
— Potenza del generatore c.c.:	315 kW.
— Capacità del banco di condensatori:	$3\,700 \cdot 10^{-6}$ F.
— Valore dell'induttanza di protezione:	53 mH.

3) *Iniettore.*

— Tipo d'iniettore usato:	Van de Graaff (tipo KS-3 MeV della HVEC di Cambridge, Mass.).
— Tensione acceleratrice massima:	3 milioni di volt.
— Intensità di corrente continua (max):	1 mA.
— Sorgente elettroni:	tipo Pierce con griglia controllo impulsata.
— Lunghezza del tubo acceleratore:	1.7 m.
— Caratteristiche di funzionamento pulsato:	impulsi di corrente di 100 mA picco (max) e durata $2 \mu\text{s}$ con frequenza di ripetizione di 20 s.
— Stabilizzazione del valore medio della tensione:	$\pm 0.1\%$.
— Potenza di alimentazione:	22 kVA.
— Tipo d'isolamento:	in gas compresso ($\text{N}_2 + \text{CO}_2$) a 20 kg/cm^2 .
— Peso:	6 100 kg.

4) *Impianto di accelerazione a RF.*

— No. delle cavità acceleratrici:	2 (1 cavità a frequenza modulata e bassa tensione + 1 cavità a frequenza fissa e alta tensione).
— Armonica della frequenza orbitale degli elettroni usata per l'accelerazione:	4 ^a .
— Ampiezza massima della modulazione di frequenza della 1 ^a cavità:	$\sim 2.5\%$.

- Intervallo di frequenza copribile della prima cavità (RF_1): (42.6 ÷ 43.7) MHz.
- Tensione di picco della cavità RF_1 : ~ 7 kV.
- Tipo di eccitazione della cavità RF_1 : ad amplificatore. La modulazione di frequenza è ottenuta mediante un tubo di reattanza che agisce sull'oscillatore pilota. Lo stadio finale è un amplificatore « grounded grid ». La modulazione di ampiezza è effettuata nello stadio prefinale.

- Frequenza costante della seconda cavità (RF_2): 43.7 MHz.
- Tensione di picco della cavità RF_2 : ~ 80 kV.
- Tipo di eccitazione della cavità RF_2 : effettuata con una catena di stadi amplificatori con modulazione di ampiezza prevista sul primo stadio di potenza.

- Funzionamento delle 2 cavità: impulsato a 20 s.
- Le due cavità risonanti sono agganciate in fase.

5) Ciambella ed impianto di vuoto.

- Forma della sezione radiale della ciambella: ad U con frontale piatto.
- Dimensioni esterne della ciambella: (21.2 × 7.7) cm².
- Materiale usato: Araldite B caricata con quarzo.
- Metallizzazione interna: con strisce sottili di acciaio inossidabile amagnetico, distanziate fra loro.

- No. pompe rotative: 4.
- Portata di ciascuna pompa: 60 m³/h.
- No. pompe a diffusione: 4.
- Portata di ciascuna pompa a diffusione: 3 000 l/s.

B) Elenco delle caratteristiche attuali di funzionamento.

- 1)
 - Energia cinetica d'iniezione: $T_1 = 2.5$ MeV.
 - Valore dell'impulso corrispondente: $p_1 = 2\,965$ MeV/c.
 - Velocità all'iniezione (relativa alla velocità della luce): $\beta_1 = 0.985$.
 - Frequenza orbitale all'iniezione: $\nu_1 = 10.77$ MHz.

— Frequenza orbitale per $\beta = 1$	$\nu_t = 10.93$ MHz.
— Periodo di rivoluzione all'iniezione:	$T_i = 9.28 \cdot 10^{-8}$ s.
— Periodo di rivoluzione per $\beta = 1$:	$T_t = 9.154 \cdot 10^{-8}$ s.
— No. oscillazioni di betatrone per giro (orizzontali):	$Q_h = 0.688,$
(verticali):	$Q_v = 0.863.$
— Campo magnetico sull'orbita principale all'iniezione:	$B_{i0} = 27.45$ G.
— Frequenza iniziale campo elettrico nella cavità RF_1 (4 ^a armonica):	$\nu_{e,i} = 43.1$ MHz.
— Frequenza campo elettrico nella cavità RF_2 (4 ^a armonica)	$\nu_{e,i} = 43.7$ MHz.
— Percentuale di modulazione	$\frac{\Delta v}{\bar{v}} = 1.4\%$.

I dati suddetti restano univocamente fissati dalle caratteristiche geometriche e magnetiche della macchina e dal valore dell'energia di iniezione.

2) Nel caso di accelerazione di elettroni ad una energia massima E_{\max} pari, ad esempio, ad 1 GeV, l'alimentazione del magnete è predisposta in modo che il campo magnetico nel traferro B_0 vari secondo la legge temporale

$$B_0(t) = B_b - B_a \cos \Omega t,$$

con

$$B_b = 4558 \text{ G} \quad (\text{valore del campo costante di polarizzazione}),$$

$$B_a = 4702 \text{ G} \quad (\text{valore di picco del campo alternato a } 20 \text{ Hz}),$$

$$\Omega = 125.6 \text{ s}^{-1}.$$

In tal modo risulta

$$B_{0\max} = 9260 \text{ G},$$

$$B_{0\min} = -144 \text{ G}.$$

$$\frac{dB_0}{dt} = 0.158 \text{ G}/\mu\text{s}, \quad \text{per } B_0 = B_{0i},$$

$$\sigma \simeq 0.5 \text{ cm/giro}.$$

Gli istanti relativi allo svolgimento delle operazioni necessarie all'accelerazione sono quelli indicati nella Tabella I.

L'energia massima raggiunta sino ad ora è di 1100 MeV.

3) Relativamente al funzionamento della macchina e alla intensità della radiazione γ prodotta si può dire quanto segue:

a) L'energia massima degli elettroni accelerati è regolabile con continuità entro ampi limiti (praticamente tra qualche decina di MeV e 1100 MeV che è l'energia massima raggiunta), se non sussiste la preoccupazione di ottenere impulsi lunghi di fascio.

La durata standard dell'impulso di fascio è di ~ 3 ms. A meno di non modificare la forma della modulazione di ampiezza della RF_2 , ci si deve accontentare ad energie più basse di durate più brevi in conseguenza del rapido spegnimento della RF_2 . Se si fa uso dell'impulso lungo di fascio, l'energia massima resta indeterminata entro circa l'1%.

b) In relazione all'intensità si può dire che in condizioni di funzionamento buono la macchina può fornire al minuto un numero di quanti equivalenti praticamente costante alle varie energie $((6 \div 8) \cdot 10^{11}$ quanti equivalenti al minuto). Questa intensità si intende misurata (con fascio γ non collimato), da un quantmetro posto a distanza ravvicinata al radiatore interno in modo tale da accogliere quasi completamente il fascio che è emesso entro un cono di apertura dipendente dalla energia massima degli elettroni.

BIBLIOGRAFIA

- [1] G. SALVINI: *Suppl. Nuovo Cimento*, **2**, 442 (1955).
- [2] M. S. LIVINGSTON: *Advances in Electronics*, vol. **1** (New York, 1948), p. 269.
- [3] R. R. WILSON: *Handb. d. Phys.*, vol. **44** (1959), p. 170.
- [4] D. W. KERST and R. SERBER: *Phys. Rev.*, **60**, 53 (1941).
- [5] M. S. LIVINGSTON: *High-Energy Accelerators* (New York, 1954).
- [6] E. M. McMILLAN: *Phys. Rev.*, **68**, 143 (1945).
- [7] E. PERSICO: *Suppl. Nuovo Cimento*, **2**, 459 (1955).
- [8] J. SCHWINGER: *Phys. Rev.*, **75**, 1912 (1949).
- [9] M. SANDS: *Phys. Rev.*, **97**, 470 (1955).
- [10] M. SANDS: *Proc. Intern. Conference on High-Energy Accelerators and Instrumentation* (CERN, 1959), p. 298.
- [11] G. DIAMBRINI, A. S. FIGUERA, B. RISPOLI e A. SERRA: *Nuovo Cimento*, **19**, 250 (1961).
- [12] H. BETHE e W. HEITLER: *Proc. Roy. Soc. (London)*, **146**, 83 (1934).
- [13] L. I. SCHIFF: *Phys. Rev.*, **83**, 252 (1951).
- [14] R. R. WILSON: *The Cornell BeV Synchrotron*, Cornell Internal Report (1956).
- [15] R. J. VAN DE GRAAFF, J. G. TRUMP e W. W. BUECHNER: *Reports on Progress in Physics*, vol. **11** (London, 1948), p. 1.
- [16] R. J. VAN DE GRAAFF, W. W. BUECHNER, W. M. WOODWARD, L. R. MACINTOSH, E. A. BURRIL e A. SPERDUTO: *Phys. Rev.*, **70**, 797 (1946).
- [17] J. R. PIERCE: *Theory and Design of Electron Beams* (New York, 1954).
- [18] G. CORAZZA: Relazione no. DO 15 dei Laboratori Nazionali di Frascati (1957).