

Laboratori Nazionali di Frascati

LNF-56/34 (1956)

G. Sacerdoti, R. Toschi: RASSEGNA DELLE MACCHINE ACCELERATRICI DI PARTICELLE ATTUALMENTE USATE NELLE RICERCHE DI FISICA NUCLEARE.

Estratto da: L'Elettrotecnica 43, 210 (1956)

RASSEGNA DELLE MACCHINE ACCELERATRICI DI PARTICELLE ATTUALMENTE USATE NELLE RICERCHE DI FISICA NUCLEARE

G. SACERDOTI - R. TOSCHI (*)

Nelle ricerche di fisica nucleare è necessario disporre di fasci di particelle monoenergetiche. Per questo scopo si usano le macchine acceleratrici.

In questo articolo ne vengono descritti i tipi principali a seconda della loro prestazione e il loro campo di applicazione.

§ 1. - INTRODUZIONE.

Le sorgenti di particelle esistenti in natura sono le sostanze radioattive e i raggi cosmici [1] [2].

Le particelle liberate dalle sostanze radioattive sono in generale dotate di energie non superiori ad una decina di Mev (1).

Le particelle che costituiscono i raggi cosmici possono raggiungere energie elevate (anche qualche decina di Gev), ma l'intensità di queste radiazioni, cioè il numero di particelle per unità di tempo e di area, è bassa.

Poiché le esperienze di fisica nucleare hanno carattere prevalentemente statistico, è necessario disporre di sorgenti intense per evitare di prolungare eccessivamente la durata delle esperienze stesse. Inoltre per facilitare l'interpretazione dei risultati è utile eseguire esperienze con particelle monoenergetiche di energia conosciuta.

Per queste ragioni le sorgenti naturali di particelle si sono dimostrate insufficienti e si è presentato necessario costruire sorgenti artificiali sufficientemente intense di energie comprese fra pochi eV a qualche decina di Gev.

Al variare dell'energia delle particelle cambiano le interazioni di queste con la materia e i prodotti del loro bombardamento. Per es. per provocare una reazione nucleare nella quale si perturba l'equilibrio del nucleo è necessario che la particella abbia una energia superiore a qualche Mev che le permetta di avvicinarsi sufficientemente al nucleo [3] [4]. Con particelle di energia di parecchi Mev si può indagare sulla struttura del nucleo e delle forze nucleari e conoscere le energie di disintegrazione e di eccitazione del nucleo e le sue condizioni di stabilità. In tali reazioni si hanno spesso emissioni di particelle che nel caso di alte energie, possono essere mesoni μ (150 Mev), mesoni π (300 Mev) e mesoni τ (600 Mev) [3] [4].

Gli acceleratori di particelle si possono suddividere in base al principio di funzionamento come segue:

1) Moltiplicatori di tensione.

In queste macchine le particelle vengono accelerate dal campo elettrico creato dalla differenza di potenziale

(*) Ingg. GIANCARLO SACERDOTI e ROMANO TOSCHI, dell'I.N.F.N., Roma.

(1) L'energia di una particella si misura in elettronvolt. Questa unità di misura è data dal prodotto eV della carica di un elettrone per la differenza di potenziale di 1 volt.

Il Mev equivale ad 1 milione di eV; il Gev equivale ad 1 miliardo di eV.

che si stabilisce fra due armature. Sono costituiti da una catena di elementi (condensatori, trasformatori, raddrizzatori) disposti in serie o in cascata ai capi della quale si ottiene una tensione multipla di quella ottenibile con un solo elemento [2] [7] [12].

2) Generatori elettrostatici.

Come nei moltiplicatori di tensione, le particelle vengono accelerate da un campo elettrostatico.

La caratteristica di questi tipi di generatori è la presenza di un mezzo che trasporta gli elettroni che caricano un elettrodo al potenziale voluto [7] [12] [15].

3) Acceleratori lineari.

Le particelle vengono accelerate dal campo elettrico di un'onda elettromagnetica che le accompagna nel loro moto in linea retta [6] [8] [14] [15].

4) Ciclotroni.

Le particelle vengono accelerate da un campo elettrico alternato a frequenza fissa che ha sede fra le espansioni di un elettromagnete che costringe le particelle a descrivere una spirale [7] [11].

5) Sincrociclotroni.

Differiscono dai ciclotroni per avere il campo elettrico a frequenza modulata [6] [7] [10].

6) Betatroni.

Le particelle vengono accelerate dal campo elettrico associato ad un flusso magnetico variabile. Esse percorrono, per la presenza del campo magnetico, un'orbita quasi circolare [5] [6] [9].

7) Sincrotroni.

Le particelle vengono accelerate da una o più cavità risonanti che esse attraversano guidate da un campo magnetico creato da un elettromagnete [3] [5] [10] [11] [13] [16] [17].

§ 2. - MOLTIPLICATORI DI TENSIONE.

Un filtro costituito da trasformatori e rettificatori del tipo di quelli usati come sorgenti di corrente continua nella normale tecnica della radiotelevisione può essere considerato come il tipo più comune e semplice di moltiplicatori di tensione. Con questo sistema non si possono superare tensioni dell'ordine di 100 kV per difficoltà di isolamento. Tensioni più alte si possono raggiungere con un moltiplicatore di tensione il cui schema è indicato in fig. 1. Una macchina di questo tipo è comunemente conosciuta come acceleratore di Cockroft-

Walton dal nome di coloro che per primi l'hanno realizzata.

Il funzionamento del circuito di fig. 1 si può descrivere seguendo il processo di carica dall'inizio di un ciclo in cui la tensione V ai capi del trasformatore T è nulla e i condensatori sono scarichi.

I fase: V raggiunge il valore massimo V_{max} secondo la polarità indicata in fig. 1. C_1 si carica attraverso il tubo T_1 , alla tensione V_{max} .

II fase: $V = -V_{max}$. C_2 si carica attraverso T_2 alla tensione $\frac{2C_1}{C_1+C_2} V_{max}$ e C_1 si scarica parzialmente.

III fase: $V = +V_{max}$. C_1 ricarica alla tensione V_{max} e C_2 si scarica parzialmente attraverso i tubi T_1 e T_3 su C_3 .

Nei successivi cicli il processo di carica continua interessando successivamente i singoli condensatori, la cui

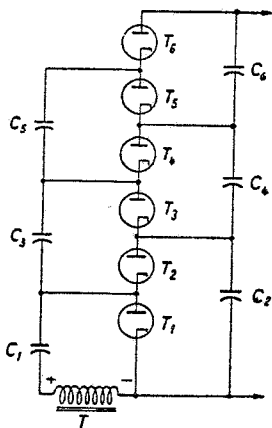


Fig. 1. — Circuito di un moltiplicatore di tensione Cockroft-Walton

tensione tende al valore $2V_{max}$ (eccetto C_1). Con questo tipo di circuito si incontrano difficoltà nel ripartire uniformemente la tensione fra gli elementi e nell'evitare fughe di corrente nei condensatori. Per queste ragioni, oltre che per motivi di ingombro, non si può aumentare indefinitamente il numero degli elementi. Per ridurre questi inconvenienti spesso si ricorre all'immersione di questi in gas o liquidi di alta rigidità anche in pressione. Con questi acceleratori si sono raggiunte tensioni dell'ordine di alcuni MV e frequenze di scarica di alcune centinaia di impulsi al secondo.

La tensione di scarica si può realizzare con una precisione di $0,5 \cdot 10^{-4}$.

Riportiamo a titolo di esempio le caratteristiche principali del Cockroft-Walton del laboratorio di Cavendish.

Numero dei diodi	12
Numero di condensatori	12
Tensione del trasformatore	220 kV
Tensione massima senza carico	1,25 MV
Frequenza di scarica	200 impulsi/sec.

Moltiplicatori di tensione possono essere realizzati con altri tipi di circuito. Il circuito di fig. 2 è analogo a quello di un generatore di impulsi. In esso i condensatori si caricano in parallelo e si scaricano in serie: la precisione nel valore della tensione è nettamente inferiore a quella ottenibile in un Cockroft-Walton. Il circuito di fig. 3 è costituito dall'insieme, in cascata, di trasformatori. Con esso le tensioni raggiungibili non superano, per difficoltà di isolamento, alcune centinaia di kV. Anche i trasformatori di impulsi di alta tensione possono rientrare in questo tipo di acceleratori.

§ 3. - GENERATORI ELETTROSTATICI.

Il tipo più comune tra gli acceleratori elettrostatici è quello che porta il nome di Van der Graff.

In fig. 4 è rappresentato lo schema di tale macchina.

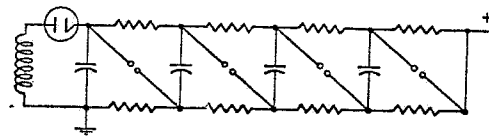


Fig. 2. — Circuito di un generatore d'impulsi.

Il funzionamento si può così sintetizzare. Le punte 1 (vedi fig. 4), mantenute ad un opportuno potenziale, trasferiscono gli elettroni su una cinghia isolata mossa dalle pulegge 4. Mediante le punte 2 le cariche vengono cedute all'involucro metallico 5, la cui tensione aumenta fino a che la corrente di carica non è uguale a quella di fuga.

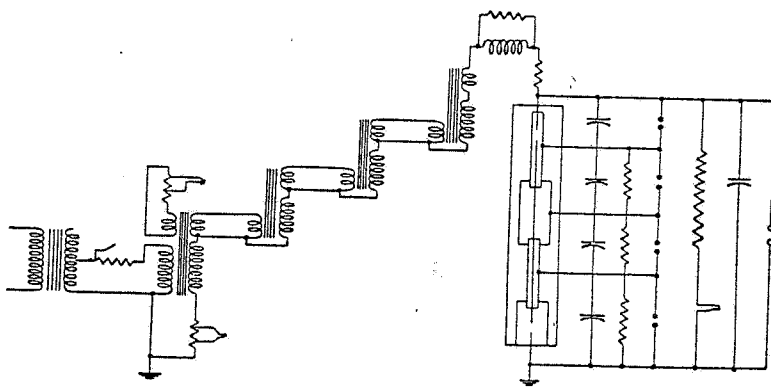


Fig. 3. — Schema di un moltiplicatore di tensione con i trasformatori in cascata.

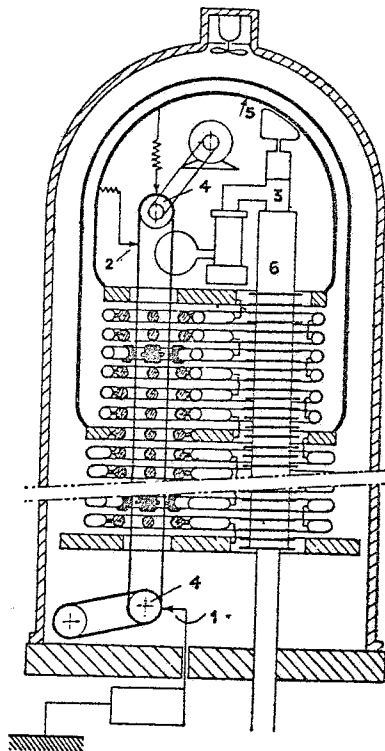


Fig. 4. — Schema di un Van der Graff.

Le particelle che si formano in 3 vengono accelerate lungo il tubo 6. Conviene evidentemente limitare le fu-

ghe di corrente: a questo scopo si immerge il dispositivo in un mezzo ad alto campo di rottura Ed . Per es. un elettrodo di raggio pari ad 1 metro immerso in aria secca e pura, per cui $Ed \approx 30$ kV/cm, potrà sopportare una tensione massima pari a 3 MV. Se aumenterà Ed , a parità di raggio dell'elettrodo, aumenterà anche la massima tensione di tenuta. Con analoghe considerazioni si può vedere che anche la densità massima di corrente che la cinghia può sopportare è proporzionale ad Ed . Una cinghia immersa in aria secca a pressione atmosferica può portare una corrente di carica pari a

$$I = 2,65 \cdot 10^{-5} b v \text{ ove } \begin{cases} b = \text{larghezza della cinghia} \\ v = \text{velocità della cinghia} \end{cases}$$

Per limitare le perdite per effetto corona nell'usuale tecnica si cerca di rendere il più uniforme possibile il gradiente di potenziale tra l'elettrodo e terra mediante anelli o involucri metallici collegati da resistenze.

Con questi generatori si sono raggiunte tensioni anche di 12 MV. Le correnti massime raggiunte nei tipi già costruiti sono di qualche centinaio di μA .

Il grado di stabilizzazione della tensione può essere portata con una doppia regolazione a $\pm 10^4$.

§ 4. - CICLOTRONI.

Il primo ciclotrone è stato costruito da Lawrence e Livigston negli anni 1927-1928. La sua costruzione ha rappresentato una tappa fondamentale nel progresso delle macchine acceleratrici, perchè, per la prima volta per accelerare le particelle si è pensato di obbligarle, mediante un elettromagnete, a ripassare un grandissimo numero di volte in una zona dello spazio in cui è localizzato il campo elettrico che le accelera. Questo principio di funzionamento è stato adottato nei betatroni e nei sincrotroni che attualmente sono le macchine economicamente più convenienti per accelerare le particelle ad energie comprese tra qualche decina di MeV fino ad energie elevate (1 GeV per gli elettroni, 20-25 GeV per i protoni).

Entro l'intraferro di un elettromagnete di sezione circolare (vedi fig. 5) sono disposti due gusci metallici (dees). Le particelle iniettate a bassa energia al centro dell'intraferro percorrono una spirale.

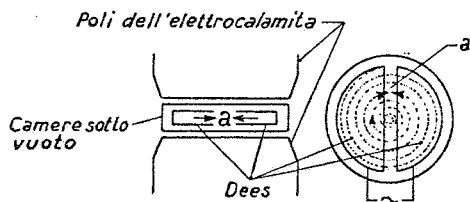


Fig. 5. — Schema di un ciclotrone.

I « dees » sono eccitati ad una frequenza di valore tale che quando una particella passa da un dees all'altro (tratto a di fig. 5), trova una tensione che l'accelera.

La frequenza f di eccitazione deve essere legata alla massa m e alla carica e della particella accelerata dalla relazione (vedi Appendice I).

$$(1) \quad f = \frac{e B}{2 \pi m}$$

essendo

$$\frac{e B}{2 \pi m}$$

la frequenza di rivoluzione delle particelle, e B l'induzione magnetica tra le espansioni polari dell'elettromagnete.

Fino a che m può considerarsi costante, cioè fino a che le particelle non raggiungono velocità relativistiche la frequenza f può rimanere costante e le particelle escono praticamente in un fascio continuo, modulato in realtà colla frequenza f , anche di intensità notevole (fino a 100 μA).

Se m diventa relativistica per soddisfare la (1) si può modulare f o variare l'induzione magnetica B nel tempo o creare un'induzione B funzione crescente del raggio del magnete.

L'ultima soluzione che si può ottenere tecnicamente sagomando opportunamente l'espansione polare non si può adottare perchè così facendo il campo magnetico per la configurazione che viene ad assumere nell'intraferro esercita sulle particelle una forza che le allontana dal piano mediano geometrico non appena queste se ne discostano anche di poco e le particelle andrebbero così perdute. Pertanto non si può adottare tale soluzione.

Modulando f si ha emissione di particelle accelerate non continua ma ad impulsi.

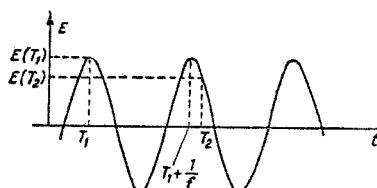


Fig. 6.

In tale caso il ciclotrone prende il nome di sincrociclotrone. Il numero di impulsi al secondo è pari alla frequenza di modulazione di f .

L'intensità del fascio di particelle si riduce quindi sensibilmente (a qualche μA).

Riportiamo a titolo di esempio i dati relativi ad un ciclotrone attualmente funzionante all'Università di Stoccolma in Svezia.

Peso magnete	400	tonn
Peso rame	27	tonn
Diametro dell'espansione polare	2,25	m
Potenza di alimentazione corrispondente ad una energia delle particelle di 25 Mev	60	kW
Massima potenza di alimentazione	240	kW
Raggio magnete	090	m
Induzione massima	1,15	Wb/m ²
Frequenza f	8,5	MHz
Potenza della cavità risonante	230	kW
Corrente di protoni	300	mA
Energia dei protoni	25	Mev

§ 5. - BETATRONI.

Nel betatrone le particelle vengono accelerate mediante il campo elettrico provocato da una variazione di flusso magnetico.

In fig. 7 è indicato lo schema di un betatrone. Le particelle sono iniettate in un anello torico (ciambella) nel quale viene mantenuto un vuoto di almeno 10^{-5} mmHg onde evitare che le particelle vengano rallentate o deviate dagli urti contro le molecole d'aria. La ciambella si trova tra le espansioni polari di un elettromagnete tra le quali si crea un campo magnetico B crescente nel tempo con l'energia delle particelle che costringe queste ultime a curvare la propria traiettoria in modo da rimanere entro la ciambella. Il campo elettrico associato alla variazione del flusso concatenato con l'orbita dalle particelle le accelera aumentando l'energia.

All'istante in cui la particella entra tra le espansioni polari si trova un ben determinato campo magnetico.

Data l'energia dell'elettrone e dato il valore del campo magnetico resta definita un'orbita stabile per la particella stessa, vale a dire un'orbita (una circonferenza nel caso del betatrone) tale che se una particella di data energia venisse iniettata tangente ad essa e il campo magnetico non mutasse nel tempo, la particella rimarrebbe su questa orbita.

Affinchè l'orbita delle particelle sia a raggio costante deve, per tutte le fasi di accelerazione, valere la seguente relazione

$$(2) \quad 2 \pi R^2 \Delta B = \Delta \Phi$$

ove:

ΔB = incremento dell'induzione magnetica R sull'orbita delle particelle;

$\Delta \Phi$ = incremento del flusso concatenato con l'orbita;

R = raggio dell'orbita delle particelle.

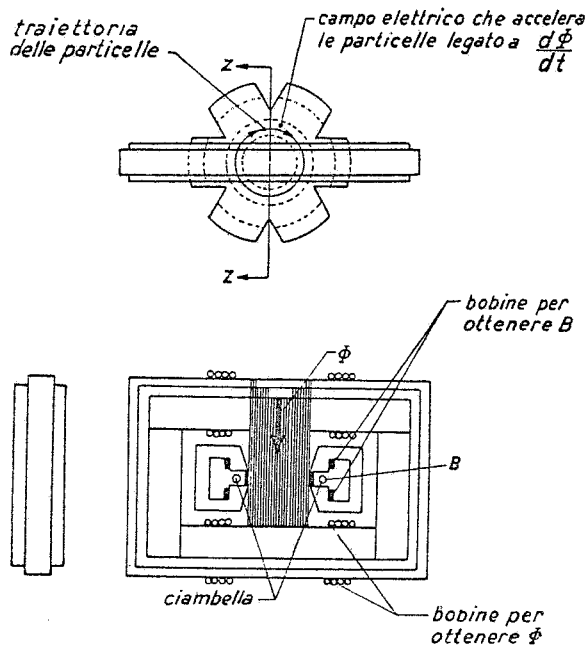


Fig. 7. — Schema di un betatrone.

La particella iniettata oscilla intorno a questa orbita con oscillazioni pendolari (oscillazioni di betatrone) le cui ampiezze sono determinate dalle condizioni delle particelle all'iniezione, dalle irregolarità del campo magnetico nell'intraferro e dalle deviazioni delle particelle a causa degli urti contro le molecole d'aria.

Queste oscillazioni in funzione dell'azimut sono descritte dalle seguenti equazioni:

$$3) \quad \begin{cases} z'' - (1 - n) z = 0 \\ \Delta R'' - n \Delta R = 0 \end{cases}$$

ove n è l'esponente che lega l'induzione magnetica B nel piano mediano dell'intraferro ($z = 0$) al raggio R attraverso la relazione $Z = \text{cost}/R^n$ valida per ogni valore dell'azimut.

Perchè le oscillazioni siano di ampiezza limitata, cioè il campo magnetico focalizzi le particelle, n deve essere compreso fra zero e 1.

La focalizzazione delle particelle si può ottenere inoltre alternando settori con $n > 1$ ad altri con $n < 1$. In tal caso la macchina si dice a foccheggiamento forte.

L'induzione magnetica B e il flusso Φ possono avere o l'andamento indicato in fig. 8 o quello indicato in fig. 9.

Una eccitazione del tipo indicato in fig. 9 permette

una notevole economia nel ferro. Per utilizzare bene il ferro sarà conveniente portare al valore di saturazione sia l'induzione B' nel ferro dell'elettromagnete che l'in-

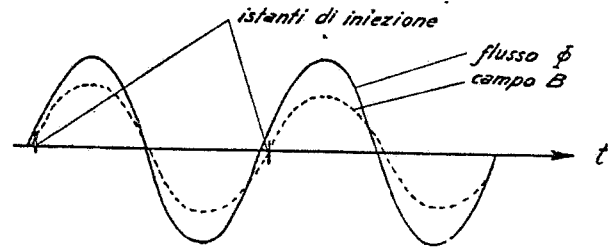


Fig. 8. — Andamento di B e Φ in un betatrone.

duzione B'' del nucleo centrale predisposto per realizzare Φ .

Dall'esame della (2) segue che, adottando una eccitazione del tipo di fig. 8, quando B'' ha raggiunto il valore di saturazione B' è $\leq B''/2$.

Adottando invece la soluzione del tipo di fig. 9 si ha che sia B' che B'' possono raggiungere circa il valore di saturazione. A titolo di esempio riportiamo i dati relativi al betatrone costruito e funzionante attualmente presso l'Università di Saskatchewan:

Peso del betatrone (tonn)	5	tonn
tensione del magnete (a 22 Mev)	8000	Volt
corrente del magnete	18	Amp
capacità in parallelo al magnete	10	μF
potenza attiva di alimentazione del magnete	48	kW
raggio dell'orbita di equilibrio	0,20	m
induzione magnetica B'	0,400	Wb/m
n	0,75	
Induzione magnetica B''	1,1	Wb/m ²
Energia massima	27	MeV
Precisione dell'energia massima	< 5	MeV

§ 6. - SINCROTRONI.

Il sincrotrone proposto nel 1945 da MacMillan e Veskler contemporaneamente, è attualmente la macchina

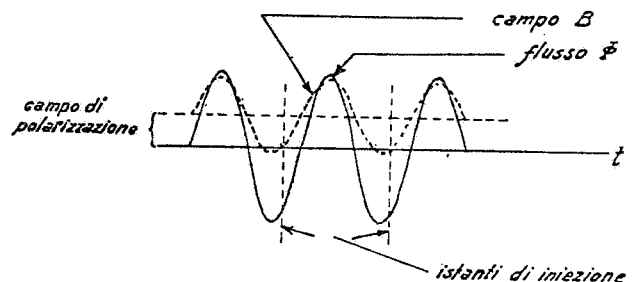


Fig. 9. — Andamento di B e Φ in un betatrone.

acceleratrice più usata per produrre particelle di alta energia.

Nella fig. 10 è schematizzato un sincrotrone nei suoi elementi essenziali. Nell'intraferro di un elettromagnete (vedi fig. 10) è sistemata la ciambella nella quale periodicamente vengono iniettate le particelle da accelerare. Queste percorrono, costrette dal campo magnetico, con una certa frequenza di rivoluzione, orbite pressochè circolari il cui raggio è legato all'energia delle porticelle iniettate dalla seguente relazione (legge di Lorentz)

$$(4) \quad BR = KE$$

ove:

- B = induzione magnetica nell'intraferro;
- R = raggio dell'orbita di rivoluzione;
- E = energia della particella;
- K = costante.

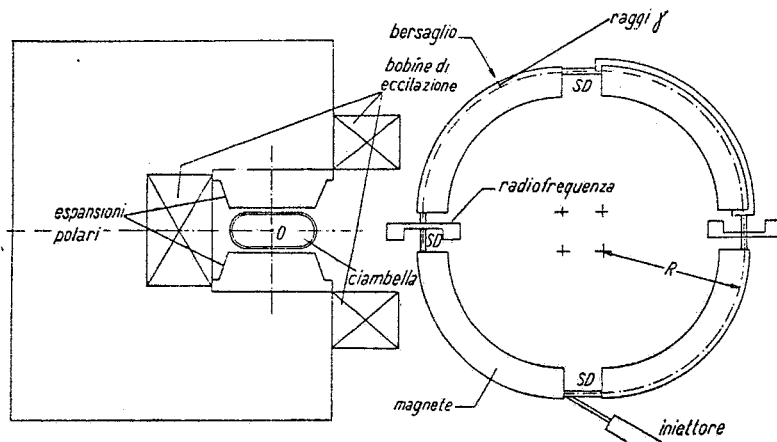


Fig. 10. — Schema di un sincrotrone.

Il campo magnetico cresce nel tempo e contemporaneamente le particelle attraversando una cavità risonante (vedi fig. 10) eccitata con frequenza $f(B)$ pari all'inverso del periodo di rivoluzione delle particelle e opportuna tensione $V(B)$, accrescono la loro energia.

Perchè le particelle vengano accelerate devono attraversare la cavità quando la tensione $V(B)$ abbia una

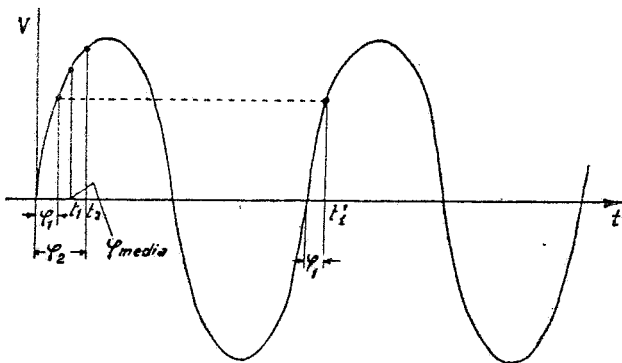


Fig. 11. — Spiegazione qualitativa della stabilità di fase di un sincrotrone.

opportuna fase. È facilmente dimostrabile che entro certi limiti si ha stabilità di fase; se le particelle acqui-

stan troppa energia passano su un'orbita di raggio maggiore e arrivano in ritardo tra i piatti della cavità e così nel giro successivo acquistano una energia minore (vedi fig. 11). L'iniziale sfasamento si risolve in una pendolazione radiale della particella (oscillazioni di sincrotrone).

L'ampiezza di queste oscillazioni determina insieme all'ampiezza delle oscillazioni di betatrone, di cui abbiamo parlato a proposito dei betatroni, le dimensioni della ciambella.

Il campo magnetico B nell'intraferro può avere nel tempo l'andamento indicato nelle figure 12, 13 e 14. In esse T_i è l'istante di iniezione delle particelle che vengono accelerate fino al tempo T_u .

In figg. 15, 16 e 17 sono indicati gli schemi dei circuiti di eccitazione necessari per realizzare rispettivamente gli andamenti di B di figg. 12, 13 e 14.

In generale i circuiti di figg. 16 e 17 sono più costosi di quello di fig. 15. Per sincrotroni di grandi dimensioni il circuito di fig. 16 è più economico di quello di fig. 17. È da notare che, in pratica, con il circuito di fig. 15, il numero di impulsi al secondo di particelle accelerate è inferiore

($1/20 \div 1/30$) di quello ottenibile con i circuiti di figure 16 e 17.

§ 7. - ACCELERATORI LINEARI.

Negli acceleratori lineari le particelle si muovono di moto rettilineo passando attraverso una serie di coppie di elettrodi tra le quali viene applicata una tensione alternata V_a di frequenza f .

La distanza tra le coppie di elettrodi, la frequenza e fase della tensione applicata sono tali che la particella al passaggio attraverso ogni coppia di elettrodi riceve un incremento di energia.

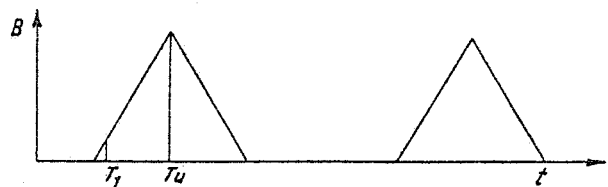


Fig. 12.

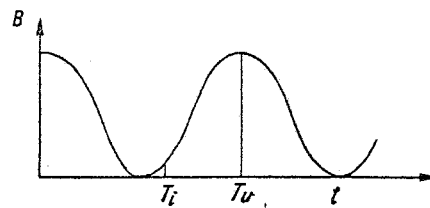


Fig. 13.

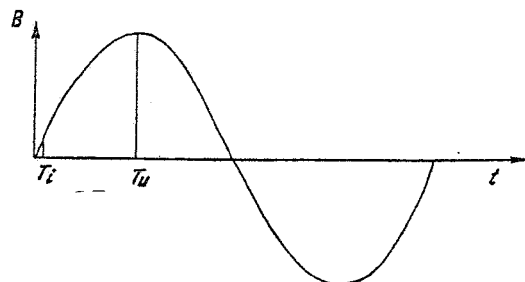


Fig. 14.

Andamenti dell'induzione magnetica nell'intraferro di un sincrotrone.

Come per i sincrotroni, anche per questi tipi di acceleratori sussiste la stabilità di fase. In fig. 18 è rappresentato l'andamento nel tempo della tensione fra una coppia di elettrodi.

Se la particella passa al tempo t_1 tra una coppia di elettrodi corrispondente alla fase φ_1 della tensione V_a passerà nella stessa fase tra la coppia di elettrodi successiva. Se passa invece al tempo $t_2 > t_1$ la particella acquisterà una maggiore velocità e attraverserà la successiva coppia al tempo $t_2' < t_1'$. Si hanno così oscillazioni di fase intorno a φ_1 per le particelle che passano attraverso gli elettrodi nel tratto crescente della tensione V_a .

In questi acceleratori la focalizzazione delle particelle è più difficile che negli acceleratori a campo magnetico. Infatti una particella che si muova di moto rettilineo

elettrico; in tal caso si diminuisce l'intensità del fascio a causa degli urti delle particelle contro le griglie.

Costruttivamente un acceleratore lineare si può realizzare predisponendo una serie di cavità risonanti in serie eccitate in opportuna fase (onde stazionarie) o me-

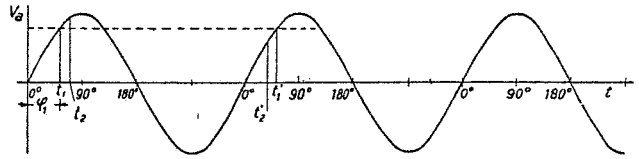


Fig. 18. — Andamento della tensione V_a fra una coppia di elettrodi in un acceleratore lineare.

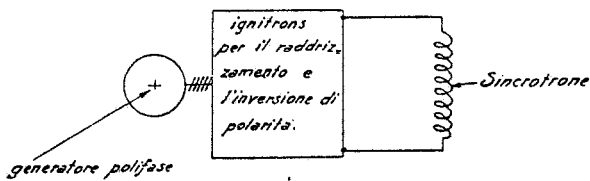


Fig. 15.

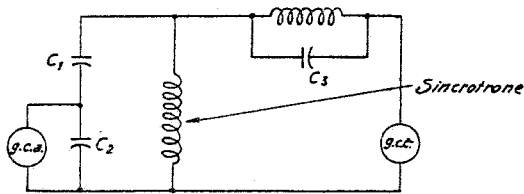


Fig. 16.

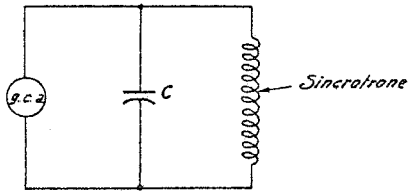


Fig. 17.

Schemi dei circuiti di eccitazione di un sincrotrone.

su una traiettoria diversa da quella mediana (vedi figura 19), quando passa tra una coppia di elettrodi a causa della configurazione del campo elettrico, nella prima parte del percorso viene sospinta verso la traiettoria mediana, nella seconda parte verso l'esterno: la forza focalizzante F_f (verso l'interno) prevale su quella defocalizzante F_d , a basse energie, quando cioè, a causa della sensibile variazione delle velocità della particella, il tempo in cui è sottoposta a F_f è maggiore di quello durante il quale agisce F_d .

Ad energie più alte in cui l'incremento di velocità delle particelle è trascurabile rispetto all'incremento della massa, l'effetto defocalizzante prevale su quello focalizzante a causa dell'aumento della tensione V_a (vedi quanto si è detto a proposito della stabilità di fase) e quindi del campo elettrico E , durante il passaggio della particella. Tuttavia, se le energie sono molto alte, gli spostamenti delle particelle verso le pareti dovute al campo elettrico E , sono di lieve entità a causa della grande massa dinamica che le particelle vengono ad avere.

Per focalizzare le particelle ad energie basse si usa disporre griglie (vedi fig. 19) che deformano il campo

diante una guida d'onda sagomata (onde migranti), in modo da far sì che la cresta dell'onda elettromagnetica che accelera le particelle si muova colla velocità delle particelle accelerate: le particelle in questo caso muovendosi in sincronismo con l'onda ne assorbono l'energia. L'alimentazione delle cavità risonanti è ottenuta in generale con una serie di klystron.

Gli acceleratori lineari sono stati proposti dal prof. Wideroe ancora prima del betatrone. Sono meno diffusi dei betatroni per le difficoltà incontrate sia nella focalizzazione, sia nella alimentazione la quale richiede forti potenze a frequenze di solito elevate. Tuttavia, oggi queste macchine appaiono come l'unico mezzo per accelerare elettroni oltre 1 000 MeV, sia perchè al disopra di questo limite nelle macchine circolari (betatroni, sincrotroni) le perdite per irraggiamento diventano troppo elevate, sia per ragioni economiche.

Anche per protoni si prevede che gli acceleratori lineari prevarranno su quelli circolari quando si arrivi a energie superiori di alcune decine di BeV.

Gli acceleratori lineari sono macchine di grosse dimensioni e dato il loro sviluppo rettilineo presentano, quando le energie diventano elevate, difficoltà costruttive; infatti, ammesso di poter creare un campo di 30 000 volt/cm su tutta la lunghezza dell'acceleratore, per arrivare ad energie di un BeV la lunghezza dell'acceleratore dovrà essere di circa 300 metri.

A titolo di esempio riportiamo i dati relativi ad un acceleratore lineare costruito e attualmente funzionante:

Lunghezza	70 m
Numero di sezioni indipendenti	21
Radiofrequenza	2856 Mc
Potenze della radiofrequenza per sezione ca.	20 mW
Frequenza di ripetizione	60 Hz
Energia di risoluzione	(1,5%)
Energia massima delle particelle	380 MeV

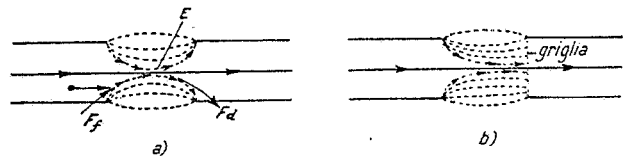


Fig. 19. — Campo elettrico tra due elettrodi di un acceleratore lineare.

- a) con un intraferro simmetrico
- b) quando si dispone di una griglia all'ingresso del 2° elettrodo.

APPENDICE I

Ammettiamo che la (1) non sia soddisfatta e che sia ad es.

$$f < \frac{eB}{2\pi m}$$

Consideriamo una particella che passi per a (vedi figura 5) nell'istante T_1 , e cioè quando il campo elettrico $E(T)$, è massimo; ripasserà tra i due gusci all'istante T_2 (vedi fig. 6) in cui $E(T_2) < E(T_1)$. Fino a che la somma degli sfasamenti

$$\Delta \psi = \sum_i \left(T_{i+1} - T_i - \frac{1}{f} \right)$$

è minore di $1/4 f$, la particella accresce la sua energia.

Quando $\Delta \psi$ diventa $\geq 1/4 f$, la particella viene decelerata. Da quanto si è detto segue che l'energia della particella non può superare un certo valore che dipende fra l'altro dal valore massimo di E e dalla precisione di f .

Tanto maggiore, a parità di E , è

$$f = \frac{B e}{2 \pi m}$$

tanto minore è l'energia che le particelle possono raggiungere.

Di solito il campo magnetico è leggermente decrescente verso l'esterno per poter focalizzare le particelle, poichè l'effetto focalizzante del campo elettrico E in a non è sufficiente a trattenere le particelle nell'intraferro.

Per le ragioni precedentemente esposte, non è possibile con ciclotroni, non essendo f modulata accelerare elettroni e con protociclotroni non è possibile superare praticamente i 25 Mev di energia.

Manoscritto pervenuto il 7 Novembre 1955.

(¹) Ci riserviamo di descrivere in un prossimo articolo, in collaborazione con gli altri ingegneri della Sezione Acceleratore dell'I.N.F.N. il progetto del sincrotrone italiano da 1000 Mv attualmente in costruzione.

BIBLIOGRAFIA

- [1] *Nuclear Geology*. Ed. John Wiley, N.Y.
- [2] A. GREEN: *Nuclear physics*. Ed. Mc Graw-Hill Co., N.Y.
- [3] S. LIVINGSTON: *High energy accelerators*. - Ed. Interscience Publisher, N.Y.
- [4] B. ROSSI: *High energy particles*. - Ed. Prentice Hall, N.Y.
- [5] S. GRIVET: *Le synchrotrons géants ou cosmotrons*. - « Revue générale de l'Electricité », 1955.
- [6] S. LIVINGSTON: *High energy accelerators*. - « Annual Review of Nuclear science ».
- [7] E. PERSICO: *Lezioni sugli acceleratori di particelle*. Ed. Università di Roma.
- [8] S. LIVINGSTON: *Particles Accelerators. Advances in Electronic*. vol. I. Ed. Morton, N.Y.
- [9] KERST e coll.: *86 Mev model of 300 Mev Betatron*. - « Review of Scientific Instruments », vol. 21, n. 5.
- [10] *The Brookhaven Cosmotron*. - « Review of Scientific instruments », vol. 24, n. 9.
- [11] SLATER: *The cyclotron and synchrotron. Microwave electronics*. Ed. Van Nostrand, N.Y.
- [12] LANGMUIR: *Electronuclear Machines*. - « Modern Physics for engineer ». Ed. Ridenour, Los Angeles.
- [13] LANGMUIR: *A 70 Mev Synchrotrons*. - « Journal of Applied physics », vol. 18.
- [14] *Recent progress in accelerators*. Report of Stand ford University.
- [15] G. SALVINI: *The italian design of 1000 Mev Electronsynchrotron*. - « Nuovo Cimento », vol. II, serie 10.

Ai soci e agli abbonati a « L'Elettrotecnica » che lo richiedano sarà inviata al prezzo ridotto di Lire 2800 annue la

BIBLIOGRAFIA ELETTROTECNICA

(dodici fascicoli mensili; circa 550 recensioni ogni fascicolo, classificate per argomenti, prezzo per il pubblico L. 3500). Fascicoli di saggio gratis a richiesta.

La « Bibliografia elettrotecnica » ha carattere e scopo nettamente diversi dai « Sunti e Sommari » pubblicati su « L'Elettrotecnica ». Essa infatti dà, nel più breve tempo possibile, il titolo e una brevissima notizia di quanto viene pubblicato su oltre 550 riviste italiane ed'estere.

I « Sunti e Sommari » danno invece — con minore prontezza — di un limitato numero di pubblicazioni un sunto abbastanza ampio da consentire in generale una sufficiente conoscenza dello scritto recensito.

Della Bibliografia sono disponibili alcune raccolte per gli anni 1947-1953.

Per chi desiderasse avere una copia in più della parte « Sunti e Sommari » de « L'Elettrotecnica » oltre a quella già contenuta nella rivista, è possibile l'abbonamento annuo ai Soci per l'importo di L. 1000.