

Laboratori Nazionali di Frascati

LNF-64/12 (1964)

F. Amman, R. Andreani, M. Bassetti, M. Bernardini, A. Cattoni, R. Cerchia, V. Chimenti, G. Corazza, D. Fabiani, E. Ferlenghi, L. Mango, A. Massarotti, C. Pellegrini, M. Placidi, M. Puglisi, G. Renzler, F. Tazzioli:
ADONE: UN ANELLO DI ACCUMULAZIONE PER ELETTRONI E POSITRONI DA 1,5 GeV.

Estratto da: Notiziario del C. N. E. N. , Anno 10, n. 3, marzo 1964.

Comitato Nazionale Energia Nucleare

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

ADONE: UN ANELLO DI ACCUMULAZIONE PER ELETTRONI E POSITRONI DA 1,5 GeV

Estratto da: *Notiziario del C.N.E.N.*, Anno 10, n. 3, marzo 1964

RT/FI (64) 17

Roma, settembre 1964

Adone: un anello di accumulazione per elettroni e positroni da 1,5 GeV

Sono ormai alcuni anni (le prime proposte risalgono al 1956) che nei Laboratori di varie nazioni si sta studiando la possibilità di costruire macchine acceleratrici a fasci incrociati, per rendere possibile lo studio delle interazioni tra particelle accelerate ad alta energia fatte collidere in modo che il sistema del baricentro coincida col sistema del laboratorio.

Nei primi studi svolti essenzialmente da quattro gruppi si è considerato l'urto elettrone-elettrone e protone-protone: al MURA (U.S.A.) e all'Istituto Lebedev (U.R.S.S.) venne sviluppato un progetto di F.F.A.G. (*Fixed Field Alternate Gradient*) a due vie; al C.E.R.N. si studiarono anelli di accumulazione per protoni; un gruppo misto Princeton-Stanford (U.S.A.) volse il suo interesse all'urto elettrone-elettrone ed iniziò, nel 1957, la costruzione di un anello a otto per elettroni da 500 MeV (1).

Nel 1960 il prof. Bruno Touschek, dell'Università di Roma, propose di esaminare la possibilità di costruire anelli di accumulazione a fasci incrociati di particelle e antiparticelle (nel caso specifico di elettroni e positroni), mettendo in luce l'interesse scientifico di questo tipo di sperimentazione, che apre un nuovo vasto campo di indagine nella fisica delle particelle elementari.

In seguito a tale proposta nei Laboratori di Frascati venne costruito un anello da 250 MeV, detto AdA (Anello di Accumulazione) (2), nel quale i primi elettroni vennero accumulati nel maggio 1961. I risultati ottenuti con AdA, a Frascati prima e nei Laboratori di Orsay (Francia) in seguito (3-6), sono stati di enorme importanza per tutti i progetti simili attualmente allo studio nel mondo.

Nel 1961 si decise di iniziare a Frascati lo studio di un anello di accumulazione per elettroni e positroni di energia maggiore (7); il lavoro del gruppo di studio incaricato di ciò si concretò in una proposta per la costruzione di due anelli, uno da 750 MeV ed uno da 1,5 GeV (8) ed i criteri informativi vennero presentati anche alla Conferenza Internazionale sugli Acceleratori per le Alte Energie a Brookhaven nel 1961 (9); questo programma venne chiamato convenzionalmente « Adone » (grande AdA).

In seguito, nel 1962 e nel 1963, iniziative analoghe vennero prese in altri Laboratori, e attualmente gli anelli di accumulazione per elettroni e positroni allo studio o in stato di costruzione, oltre a quelli già citati dei Laboratori di Frascati, sono:

FIAN, Mosca (U.R.S.S.) - 270 MeV - in costruzione, sfruttando un sincrotrone già esistente;

Orsay (Francia) - 450 MeV - in costruzione;

Stanford (U.S.A.) - 500 MeV - trasformazione dell'anello per elettroni-elettroni, al termine della sperimentazione con soli elettroni;

Novosibirsk (U.R.S.S.) - 700 MeV - in costruzione, quasi completato;

Stanford (U.S.A.) - 3.000 MeV - in progetto;

Cambridge (U.S.A.) - 3.000 MeV - in progetto;

Erevan (U.R.S.S.) - 3.000 MeV - in progetto.

Questo elenco è destinato ad allungarsi ulteriormente nel corrente anno.

Il programma Adone dei Laboratori Nazionali di Frascati sarà svolto anche con il contributo del Consiglio Nazionale delle Ricerche, il quale ha deciso di provvedere all'acquisto di un acceleratore lineare per elettroni e positroni da 440 MeV, parte essenziale di tale programma e strumento di elevato interesse scientifico anche preso a sé stante. Esso sarà usato come sorgente delle particelle da iniettare nell'anello ed anche per la sperimentazione a bassa e media energia con i fasci da esso accelerati.

Gli stadi successivi del lavoro per il progetto Adone sono documentati nella bibliografia (10-14); attualmente il progetto è completamente definito nelle sue varie parti ed è iniziata la fase di realizzazione: in particolare è già stato ordinato (nel luglio 1963) l'acceleratore lineare, è iniziata la costruzione degli edifici ed è prossima l'ordinazione della struttura magnetica. Il programma non include più l'anello ad energia intermedia di 750 MeV, ma solo quello da 1,5 GeV.

Il tempo previsto per il completamento del programma, e cioè per l'installazione dell'acceleratore lineare e per la costruzione dell'anello da 1,5 GeV, è di circa 26 ÷ 28 mesi dall'ordine della struttura magnetica; le prove sul complesso dovrebbero quindi iniziare entro la primavera del 1966 e si prevede che la messa a punto della macchina, prima dell'inizio delle esperienze, richiederà circa sei mesi.

Prima di passare ad esaminare in maggior dettaglio il tipo di sperimentazione che può eseguirsi con una macchina a fasci incrociati e le caratteristiche di tale tipo di macchina, accenniamo brevemente ai principi di funzionamento.

Un anello di accumulazione per elettroni e positroni è un sincrotrone in cui i due fasci di particelle, aventi la stessa massa e carica opposta, ruotano con velocità opposte sulla stessa orbita; vedremo in dettaglio più avanti (paragrafo terzo) in quali aspetti un anello di accumulazione si differenzi da un sincrotrone convenzionale.

Quando due fasci di elettroni e di positroni vengono fatti circolare nell'anello, nelle zone di incrocio dei fasci stessi può aver luogo l'annichilamento di un elettrone con un positrone, con una reazione del tipo di quelle che saranno esaminate nel paragrafo successivo. Poiché la probabilità di annichilamento è piccola, i fasci debbono essere intensi ed il tempo di osservazione lungo: questi due requisiti, peculiari di un anello di accumulazione, ne determinano le caratteristiche.

I fasci intensi vengono ottenuti iniettando molti successivi impulsi ed « accumulandoli » nella camera da vuoto; le caratteristiche della macchina debbono essere tali da far sì che i fasci, terminato il processo di accumulazione, circolino nell'anello, senza diminuire eccessivamente di intensità, per tempi dell'ordine di alcune ore; la loro vita media deve cioè essere dell'ordine di 5 ÷ 10 ore.

Nel funzionamento di un anello sono quindi da distinguersi due fasi: l'accumulazione, che, nel caso di Adone, richiede circa 1 ÷ 1,5 ore, durante la quale gli elettroni e i positroni provenienti dall'iniettore vengono iniettati ed accumulati nel-

DATI PRINCIPALI DI ADONE

Tabella I

Particelle accumulate		$e^+ e^-$
Energia massima	GeV	1,5
Intensità, per fascio	part.	$2 \cdot 10^{11}$
Tempo di accumulazione	ore	$1 \div 1,5$
Sezioni di incrocio libere per le esperienze		4
<i>Magnete</i>		
Focheggiamento forte		funzioni separate
Indice di campo n, nei magneti		0,5
Gradiente nei quadrupoli, all'energia max	G/cm	≈ 420
Campo magnetico nei magneti, all'energia max	G	10.000
Raggio di curvatura, nei magneti	m	5
Raggio medio dell'anello	m	16,2
Numero di periodi		12
Numero d'onda di betatrone		$3,0 \div 3,4$
Ampiezza dell'orbita chiusa per $\Delta p/p = 1\%$	cm	1,89 max
	cm	0,96 min
		$6,2 \cdot 10^{-2}$
<i>Momentum compaction</i>		
Costanti di tempo di smorzamento delle oscillazioni di betatrone:	} all'iniez. all'energ. max	
Pesi: ferro		ms
rame	ms	11
Apertura utile: radiale	t	340
verticale	t	31
	cm	22
	cm	8
<i>Iniettore</i>		
Tipo		linac-banda S
Energia di iniezione: e^+	MeV	360
e^-	MeV	375
Corrente utile di iniezione: e^+	mA	0,1
e^-	mA	25
Frequenza di ripetiz. degli impulsi di iniezione	imp/s	$\approx 0,6$
<i>Sistema di vuoto</i>		
Pressione residua	torr	10^{-9}
Pompe, tipo		ioniche
Pompe, numero e velocità di pompaggio		$24 \cdot 400$ l/s
<i>Sistema di radiofrequenza</i>		
Frequenza	Mc/s	8,9
Cavità acceleratrici		2
Energia max cedibile per giro	keV/giro	250
Potenza in ingresso alle cavità	kW	160

l'anello, e la sperimentazione, che potrà durare circa $0,5 \div 1$ vite medie dei fasci, durante la quale vengono osservate le reazioni di annichilamento tra gli elettroni e i positroni, senza che all'anello vengano rifornite nuove particelle a compensare quelle perdute.

Da questi brevi cenni si comprende che, per una buona utilizzazione della macchina, i tempi morti per la sperimentazione (ed in particolare il tempo di accumulazione) debbono essere brevi rispetto al tempo utile per la sperimentazione stessa.

I tempi di accumulazione possono essere abbreviati elevando l'energia dell'iniettore (sino al limite dell'energia massima dell'anello) o aumentando le correnti di elettroni e positroni che possono essere fornite, per impulso, dall'iniettore.

La scelta delle caratteristiche dell'acceleratore lineare iniettore di Adone è stata eseguita cercando la soluzione che, col minimo costo, assicurasse la possibilità di accumulare le intensità volute in tempi di $1 \div 1,5$ ore, e ciò nell'ipotesi di riuscire ad ottenere delle vite medie dei fasci dell'ordine di 10 ore.

Nella tabella I sono raccolti i dati principali relativi ad Adone.

LA SPERIMENTAZIONE CON FASCI INCROCIATI DI ELETTRONI E POSITRONI

La cinematica di una reazione



è illustrata in figura 1 nel caso in cui nello stato finale vi siano solo due particelle; q_1, q_2, P_1, P_2 sono i quadrivettori energia impulso delle particelle.

Una delle caratteristiche fondamentali di un anello di accumulazione per elettroni e positroni è la buona definizione in energia dei due fasci. Se E_1 ed E_2 sono le energie delle particelle che si urtano e E_s è l'energia delle particelle sincrone, si ha, in Adone:

$$\frac{\langle \Delta E^2 \rangle^{1/2}}{E_s} = \frac{\langle (E_1 - E_2)^2 \rangle^{1/2}}{E_s} = 5,4 \cdot 10^{-4} E_s \text{ (GeV)} \quad (1)$$

Poiché $E_1 \simeq E_2$ si ha anche

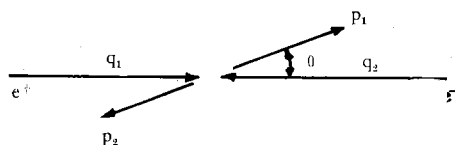
$$\vec{q}_1 + \vec{q}_2 \simeq 0$$

cioè il sistema di riferimento in cui si osservano le reazioni coincide col sistema del centro di massa dell'elettrone e del positrone.

In questo sistema l'energia messa in gioco nella reazione è:

$$E_1 + E_2 \simeq 2 E_s$$

Fig. 1



Per ottenere la stessa energia nel sistema del centro di massa nel caso di un urto fra un positrone in moto e un elettrone fermo occorrerebbe dare al positrone un'energia \bar{E} :

$$\bar{E} \simeq \frac{4 E_s^2}{2 m c^2} \quad (2)$$

La (2) mostra uno dei vantaggi, il principale, delle macchine a fasci incrociati: per ottenere un'energia disponibile nel centro di massa $2E_s = 3$ GeV (caso di Adone), nell'urto contro un elettrone fermo, il positrone dovrebbe avere la fantastica energia di 9.000 GeV.

La buona definizione in energia dei due fasci e l'alta energia, irraggiungibile con altri tipi di acceleratori, sono due dei motivi fondamentali per l'interesse in questo tipo di macchine.

Consideriamo ora quali sono le esperienze che si possono eseguire con Adone (15-16). Essenzialmente si possono dividere in tre classi:

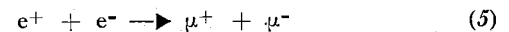
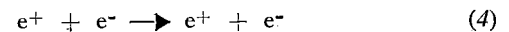
esperienze sull'elettrodinamica;

esperienze in cui nello stato finale della reazione si ottengono particelle fra cui avvengono interazioni forti;

ricerca sistematica di particelle o risonanze cariche e che quindi si possono produrre in coppie (*Panofsky program*).

Come vedremo le prime due classi non sono completamente separabili.

Alla prima classe appartengono reazioni come



e le altre in cui il numero di γ, e^\pm, μ^\pm nello stato finale è maggiore di due.

I diagrammi di Feynmann che, all'ordine più basso di approssimazione, descrivono questi processi sono dati nelle figure 2, 3, 4.

Nei tre casi si ha che il quadrato del vettore energia impulso della particella virtuale è dato rispettivamente da

$$q^2 = -4 E^2 \sin^2 \theta$$

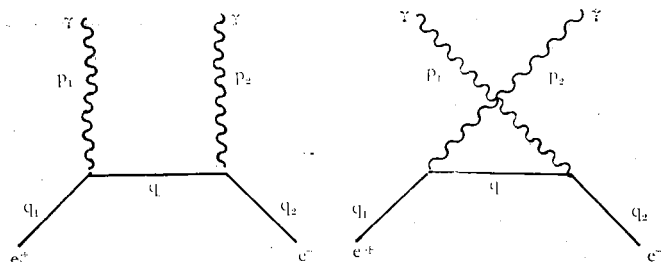
$$q^2 = -4 E^2 \sin^2 \theta \quad \text{o} \quad q^2 = 4 E^2$$

$$q^2 = 4 E^2$$

dove E è l'energia dei due fasci nella macchina e θ è l'angolo fra la linea di volo dell'elettrone e del positrone e quella delle particelle dello stato finale.

Si vede subito che le reazioni (4), (5) permettono di studiare il propagatore del fotone per valori temporali di q^2 . Inoltre con

Fig. 2



Adone si possono raggiungere dei valori di q dell'ordine di 3000 MeV/c. Con lo SLAC, l'acceleratore lineare in costruzione a Stanford e che avrà l'energia più alta fra le macchine acceleratrici per elettroni, 20 GeV, i valori di q raggiungibili nello scattering elettrone-elettrone sono dell'ordine di 140 MeV. Un impulso $q = 3000$ MeV/c corrisponde ad una lunghezza d'onda $\lambda \approx 6 \cdot 10^{-2}$ fermi.

Se l'elettrodinamica nella sua forma attuale è valida sino a lunghezze dell'ordine di Λ , si può ad esempio pensare che il propagatore del fotone sia alterato nella forma (17).

$$\frac{1}{q^2} \rightarrow \frac{1}{q^2} - \frac{1}{q^2 - (\frac{\hbar}{\Lambda})^2} \approx \frac{1}{q^2} (1 + \frac{q^2 \Lambda^2}{\hbar^2}),$$

se

$$\Lambda \ll \frac{\hbar}{q}$$

Questo fatto si manifesta con un'alterazione delle sezioni d'urto che vengono moltiplicate per un fattore

$$1 + 2 \left(\frac{q \Lambda}{\hbar} \right)^2$$

Ciò permette, con una misura di sezione d'urto al 10%, di verificare la validità della teoria sino a distanze dell'ordine

$$\text{di } \frac{\hbar}{q} 2 \cdot 10^{-1} \text{ cioè di } 1,2 \cdot 10^{-2} \text{ fermi se } q \approx 3000 \frac{\text{MeV}}{c}$$

Considerazioni analoghe si possono fare nel caso della reazione (3), che permette di esplorare il propagatore degli elettroni.

Un altro limite alla validità dell'elettrodinamica quantistica è dovuto all'interazione fra fotoni, elettroni e particelle con interazione forte. Questo effetto si può manifestare nelle reazioni (4), (5) attraverso modifiche al propagatore del fotone. Ad esempio un contributo alla produzione di coppie di μ è dato, per energie sufficientemente alte, dal processo rappresentato dal grafico di figura 5.

Il contributo di processi di questo tipo non si sa oggi calcolare a causa della scarsa conoscenza della struttura elettromagnetica dei π .

È possibile però, quando si conosca sperimentalmente la sezione d'urto per il processo

$$e^+ + e^- \rightarrow \pi^+ + \pi^-,$$

calcolare il contributo del grafico in figura 5 e quindi distinguere fra le deviazioni dall'elettrodinamica dovute alle particelle con interazioni forti e quelle dovute all'esistenza di un limite di validità per la teoria.

Fig. 3

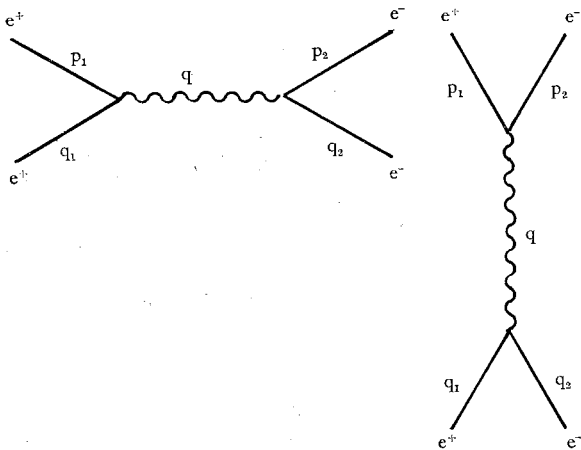


Fig. 4

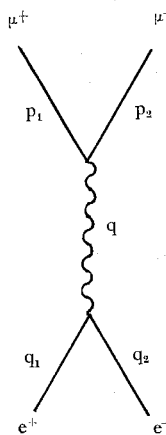


Fig. 5

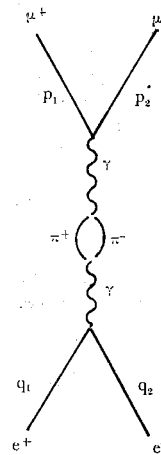
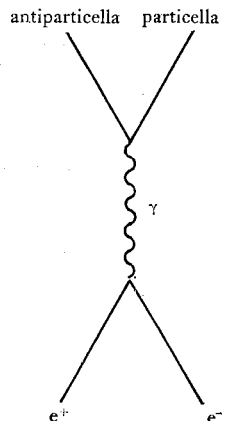


Fig. 6



Il processo di produzione di coppie di π rientra nella seconda categoria di esperienze.

Le altre reazioni di questo tipo le elenchiamo di seguito, limitandoci a quelle con due particelle nello stato finale:

a) produzione di mesoni,

$$e^+ + e^- \rightarrow \pi^+ + \pi^-, \quad (6)$$

$$e^+ + e^- \rightarrow \pi^0 + \gamma, \quad (7)$$

$$e^+ + e^- \rightarrow K^+ + K^-, \quad (8)$$

$$e^+ + e^- \rightarrow K^0 + \bar{K}^0, \quad (9)$$

b) produzione di nucleoni (N) o di iperoni (Y),

$$e^+ + e^- \rightarrow N + \bar{N}, \quad (10)$$

$$e^+ + e^- \rightarrow Y + \bar{Y}; \quad (11)$$

con una sbarra abbiamo indicato le antiparticelle.

Di particolare interesse è la reazione $e^+ + e^- \rightarrow \pi^0 + \gamma$ che serve ad esplorare la struttura dell'interazione responsabile del decadimento $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$.

Tutte le altre reazioni si possono descrivere, in approssimazione di Born, col grafico in figura 6.

Caratteristica fondamentale di queste reazioni è ancora il fatto che il momento del γ virtuale,

$$q^2 = 4 E^2,$$

è temporale. Ciò permette di esplorare i fattori di forma elettromagnetici dei mesoni, nucleoni e iperoni, cioè i vertici γ virtuale-particella-antiparticella, per valori temporali di q^2 .

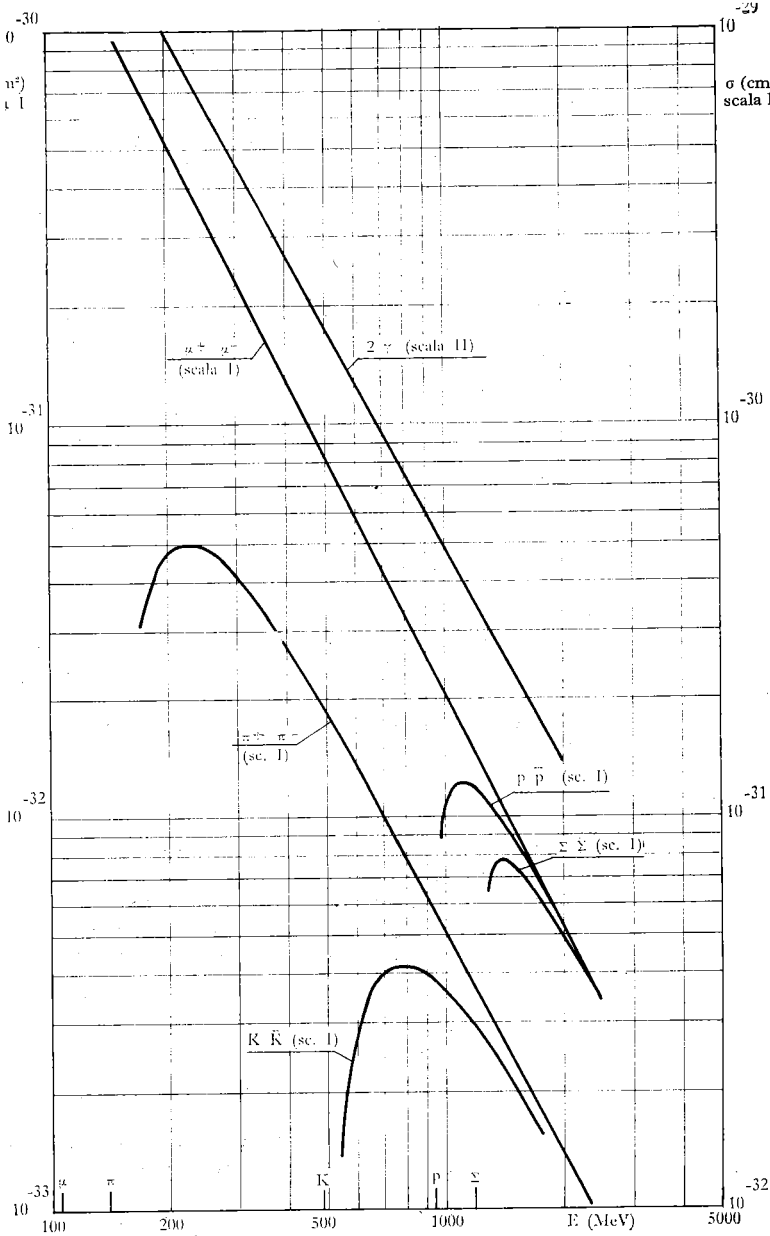
Questa possibilità offerta dagli anelli di accumulazione per elettroni e positroni è pressoché unica. Fa eccezione il solo processo

$$p + \bar{p} \rightarrow e^+ + e^-$$

attualmente in studio al C.E.R.N. dove si dispone di un intenso fascio di antiprotoni.

Infatti in questo caso la grande massa dei protoni permette di raggiungere valori elevati di q^2 anche nell'urto di antiprotoni contro protoni fermi.

In tutti i processi che avvengono con lo scambio di un solo fotone, secondo il grafico di figura 6, le particelle finali devono essere prodotte in uno stato con momento angolare totale $J = 1$, parità negativa, numero di coniugazione di carica -1 , spin isotopico 0 od 1. Ciò limita molto il numero di stati finali possibili e semplifica l'analisi dei risultati sperimentali. Inoltre questo fatto fa prevedere che le risonanze ρ , ω , ϕ , che sono caratterizzate esattamente da questi numeri quantici, possono giocare un ruolo importante in tutte le reazioni in cui lo stato finale coincide con uno dei loro canali di decadimento.



SEZIONI D'URTO PERTURBATIVE PER PRODUZIONE DI COPPIE DI PARTICELLE (FIG. 7)

Dallo studio di queste reazioni si possono quindi ottenere informazioni su queste risonanze, ad esempio sulla loro interazione col campo elettromagnetico. In particolare l'alta definizione in energia dei due fasci dovrebbe permettere una misura molto accurata delle larghezze di queste risonanze.

L'ultima categoria di esperimenti riguarda la possibilità di sviluppare sistematicamente il « Panofsky program », cioè una esplorazione dello spettro delle particelle e risonanze effettuata osservando la loro produzione in coppie da parte del γ virtuale in cui si annichilano e^+ ed e^- .

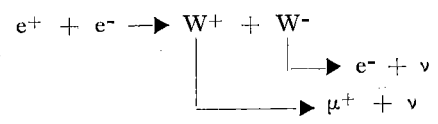
Anche in questo caso la buona risoluzione in energia dei fasci è molto importante poiché permette una misura accurata delle masse delle particelle prodotte.

Ad esempio l'esistenza del mesone vettoriale W, che media le interazioni deboli, può essere convenientemente accertata attraverso la reazione

$$e^+ + e^- \rightarrow W^+ + W^- \quad (12)$$

rivelando i prodotti di decadimento del W^\pm .

Poiché il W, se esiste, può decadere sia in $\mu + \nu$, che in $e + \nu$, la reazione (12) si può studiare osservando il processo.



Tutte le altre reazioni che possono portare ad uno stato finale con un e^- ed un μ^+ hanno sezione d'urto trascurabile rispetto a quella considerata.

Tuttavia, non essendo una reazione a due corpi nello stato finale, il riconoscimento di questo evento risulta notevolmente più complicato di quelli in cui si hanno solo due particelle nello stato finale.

Occorre ricordare che il problema della ricerca del W è già stato affrontato al C.E.R.N. (18) dove il W viene prodotto come risultato della reazione

$$\begin{array}{l} \nu + Z \rightarrow Z + W + e \\ \nu + Z \rightarrow Z + W + \mu, \end{array} \quad (13)$$

dove Z è un nucleo pesante.

I risultati preliminari ottenuti sembrano mostrare l'esistenza del W.

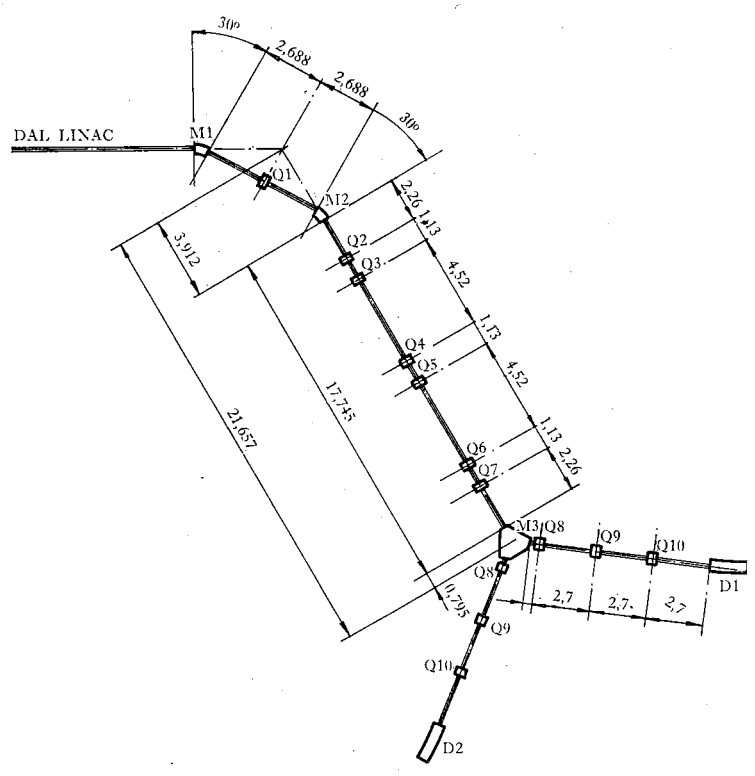
Notiamo che mentre nella reazione (13) la produzione del W avviene attraverso le interazioni deboli, nella (12) la produzione è puramente elettromagnetica. Nei due casi vengono quindi messe in evidenza caratteristiche diverse del mesone vettoriale intermedio.

A conclusione di questo breve esame delle esperienze possibili con una macchina a fasci incrociati per elettroni e positroni, riportiamo in figura 7 le sezioni d'urto totali, calcolate in approssimazione di Born, per alcune delle reazioni considerate.

CONSIDERAZIONI GENERALI DI PROGETTO

Passando ora a descrivere le caratteristiche dell'anello di accumulazione, si può subito osservare che il principio di funzionamento è quello di un sincrotrone convenzionale; cionono-

SCHEMA DELL'OTTICA DI INIEZIONE (FIG. 8)



stante le tecniche richieste nella realizzazione sono profondamente diverse perché, rispetto ad una macchina acceleratrice convenzionale, debbono essere soddisfatte un certo numero di condizioni aggiuntive, delle quali elenchiamo qui di seguito le principali:

- 1) i fasci accumulati debbono circolare nell'anello, ad energia costante, per tempi molto lunghi con basse perdite; i tempi di dimezzamento dell'intensità debbono essere dell'ordine di una decina di ore;
- 2) i due fasci debbono incrociarsi nelle zone prestabilite, mantenendo elevata la loro densità di carica;
- 3) l'accumulazione è ottenuta iniettando molti successivi impulsi nella camera da vuoto; un singolo processo di iniezione non deve quindi perturbare il fascio già accumulato;
- 4) occorre accumulare un fascio assai intenso di positroni;
- 5) nelle zone di incrocio dei fasci deve essere lasciato spazio sufficiente per disporre le apparecchiature sperimentali che rivelano gli eventi di annichilamento.

Esaminiamo brevemente alcuni argomenti caratteristici degli anelli di accumulazione, connessi ai requisiti più sopra elencati, prima di passare alla descrizione delle varie parti della macchina.

Velocità di interazione ed effetti di carica spaziale

Il numero di eventi al secondo \dot{n} , per ogni regione di incrocio dei fasci, di un processo la cui sezione d'urto totale sia σ (in cm^2), è dato da:

$$\dot{n} = \sigma f K \int_s \rho_+ \rho_- dS = L \sigma \text{ (eventi/s)}$$

dove: f è la frequenza di rivoluzione delle particelle nell'anello, K l'ordine dell'armonica della radio frequenza (o, ciò che è lo stesso, il numero di pacchetti per fascio), ρ_+ e ρ_- le densità di carica dei due fasci integrate sulla lunghezza di ciascun

pacchetto; la grandezza L , misurata in $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ o in $\text{cm}^{-2} \text{h}^{-1}$ comprende tutti i parametri dell'anello ed è chiamata luminosità.

Quando la densità trasversa dei fasci supera un certo valore critico, la distribuzione spaziale delle particelle in un fascio è alterata dalla presenza dell'altro fascio; un aumento nella densità trasversa tende prima ad aumentare le dimensioni verticali dei fasci, indi a differenziare le loro orbite medie eliminando così l'incrocio tra i due fasci (19).

Questi effetti sono stati calcolati per diversi valori della densità trasversa dei fasci e per diverse proprietà foccheggianti della struttura magnetica (20), introducendo alcune ipotesi semplificative sul processo fisico; per la macchina da noi progettata i calcoli indicano che è possibile ottenere una luminosità $L \approx 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ h}^{-1}$ con $2 \cdot 10^{11}$ elettroni e positroni circolanti.

Con questo valore di luminosità, in base alle sezioni d'urto presentate nella figura 7, si può vedere che la velocità di interazione, a seconda del tipo di evento considerato e dell'energia, è compresa tra circa 10 e 1000 eventi l'ora.

Vita media dei fasci

I processi che portano alla perdita di particelle possono essere raggruppati in quattro classi (6):

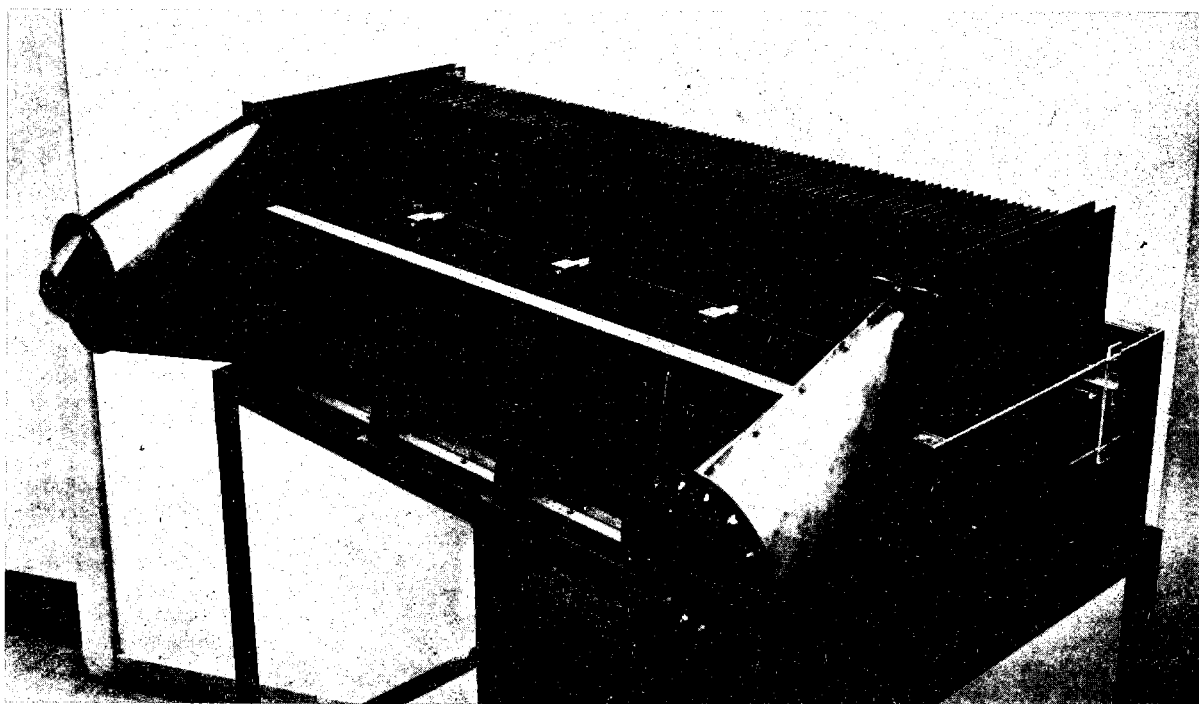
- Interazioni col gas residuo nella camera da vuoto;
- Interazioni col campo di irraggiamento (radiazione di sincrotrone);
- Interazioni tra particelle di uno stesso fascio;
- Interazioni tra i due fasci (sia dirette che indirette).

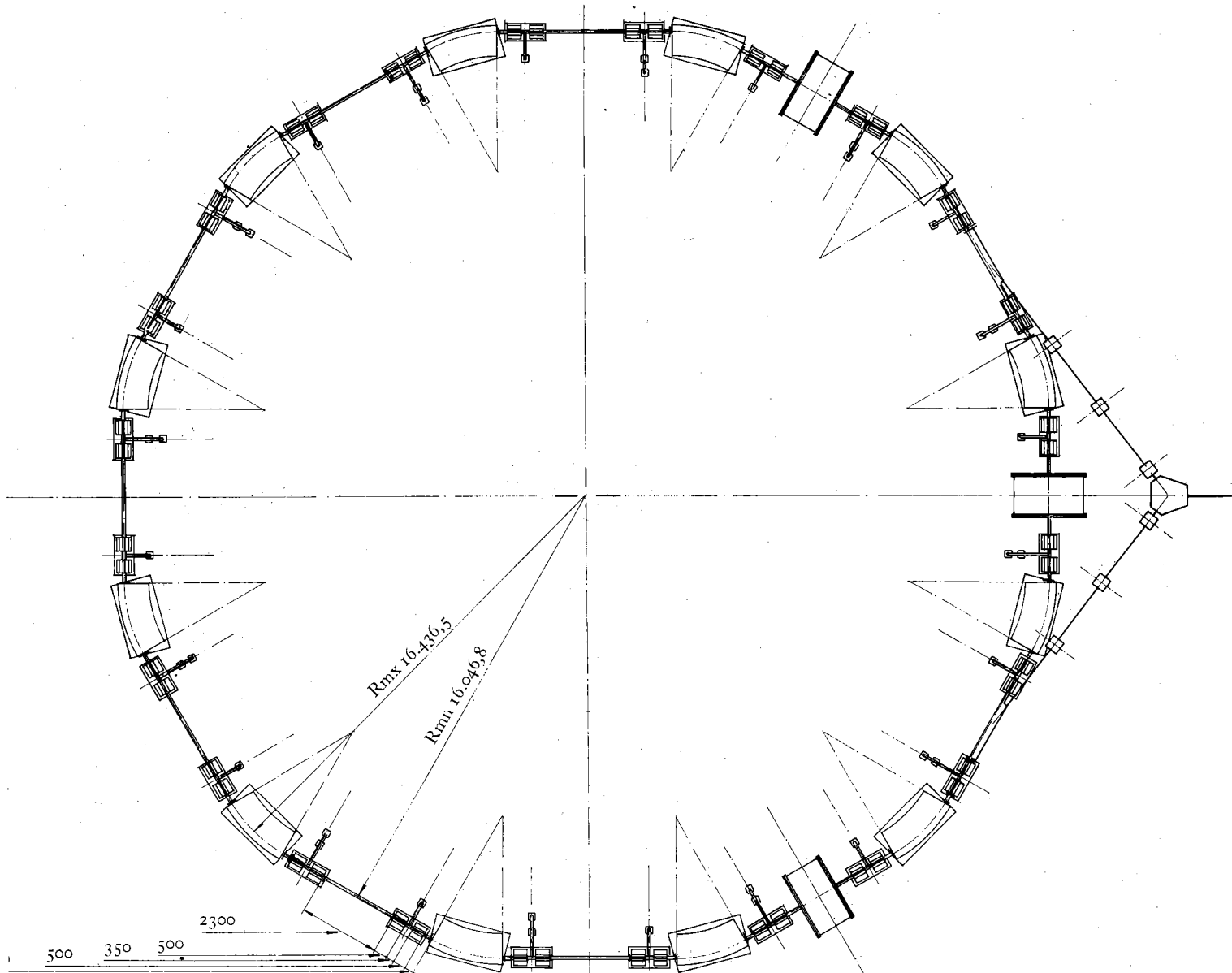
La forma più generale per la velocità di perdita delle particelle di un fascio (ad esempio degli elettroni) sarà:

$$\frac{dN_-}{dt} = -\alpha N_- - \beta N_-^2 - \gamma N_- N_+$$

dove N_- e N_+ sono le intensità dei due fasci e α , β e γ tre coefficienti contenenti le sezioni d'urto per i processi che portano alla perdita e opportuni fattori geometrici.

MODELLO DEL DEFLETTORE (FIG. 9)





PIANTA DELL'ANELLO (FIG. 10)

In generale quindi la dipendenza dal tempo dell'intensità di un fascio non è semplicemente esponenziale, ma è una funzione complessa dei vari coefficienti e dell'intensità iniziale dell'altro fascio.

Senza entrare in dettaglio nella loro valutazione quantitativa, per la quale rimandiamo a (6) (14), accenniamo brevemente ai processi che portano alla perdita delle particelle e all'ordine di grandezza della vita media del fascio, calcolata nell'ipotesi che ciascun processo in esame sia l'unico a provocare la perdita stessa.

Interazioni col gas residuo - Si può avere perdita per *bremstrahlung* sugli atomi del gas, per *scattering* contro i nuclei del gas e per *scattering* contro gli elettroni degli atomi del gas. Le vite medie relative sono in tutti e tre i casi inversamente proporzionali alla pressione del gas stesso.

In Adone il primo dei tre processi è nettamente prevalente rispetto agli altri due; la vita media, ad una pressione residua di 10^{-6} torr, risulta essere di circa $30 \div 50$ ore, a seconda dell'energia. Ottenere una pressione residua di 10^{-9} torr costituisce un problema tecnologico notevole, soprattutto se si tien conto che i due fasci accumulati irradiano una potenza pari a circa 20 kW alla massima energia in uno spettro che va dalle onde metriche ai raggi X molli; la soluzione di tale problema

è di vitale importanza in un anello di accumulazione per poter ottenere le vite medie necessarie.

Interazioni col campo di irraggiamento - La radiazione di sincrotrone è un processo quantizzato, che provoca quindi una diffusione delle particelle nel campo di forze dovute alla presenza di una cavità acceleratrice; non basta quindi che tale cavità sia in grado di rifornire la perdita media di energia per giro, ma occorre che essa possa assicurare la stabilità di fase a quelle particelle che, per una fluttuazione, si trovano ad aver irraggiato un'energia notevolmente maggiore del valore medio. Nel caso di Adone è sufficiente che le cavità siano in grado di fornire un'energia pari a 1,6 volte l'energia media persa per giro (pari a 90 keV a 1.500 MeV) per assicurare una vita media superiore a 100 ore.

Interazioni tra le particelle di uno stesso fascio - Un fascio di elettroni o positroni circolante in una macchina acceleratrice raggiunge certe dimensioni di regime a causa delle perdite per irraggiamento e delle loro fluttuazioni; ciascuna delle particelle compie delle oscillazioni di betatrone e di sincrotrone attorno al baricentro del pacchetto in modo incoerente rispetto alle altre. Se consideriamo per un momento le sole oscillazioni di betatrone, per un osservatore in moto col baricentro del pacchetto le particelle oscillano con momenti puramente trasver-

si; nel loro moto può avvenire un urto tra due di esse dopo il quale parte del momento viene trasferito lungo la direzione del moto del baricentro del pacchetto. Per la conservazione della quantità di moto tale componente longitudinale del momento sarà uguale per le due particelle e di verso opposto. Se ora osserviamo lo stesso fenomeno da un sistema di riferimento fisso nel laboratorio, ed operiamo quindi le opportune trasformazioni di Lorentz, troviamo che la variazione di momento longitudinale delle due particelle è uguale a quella già

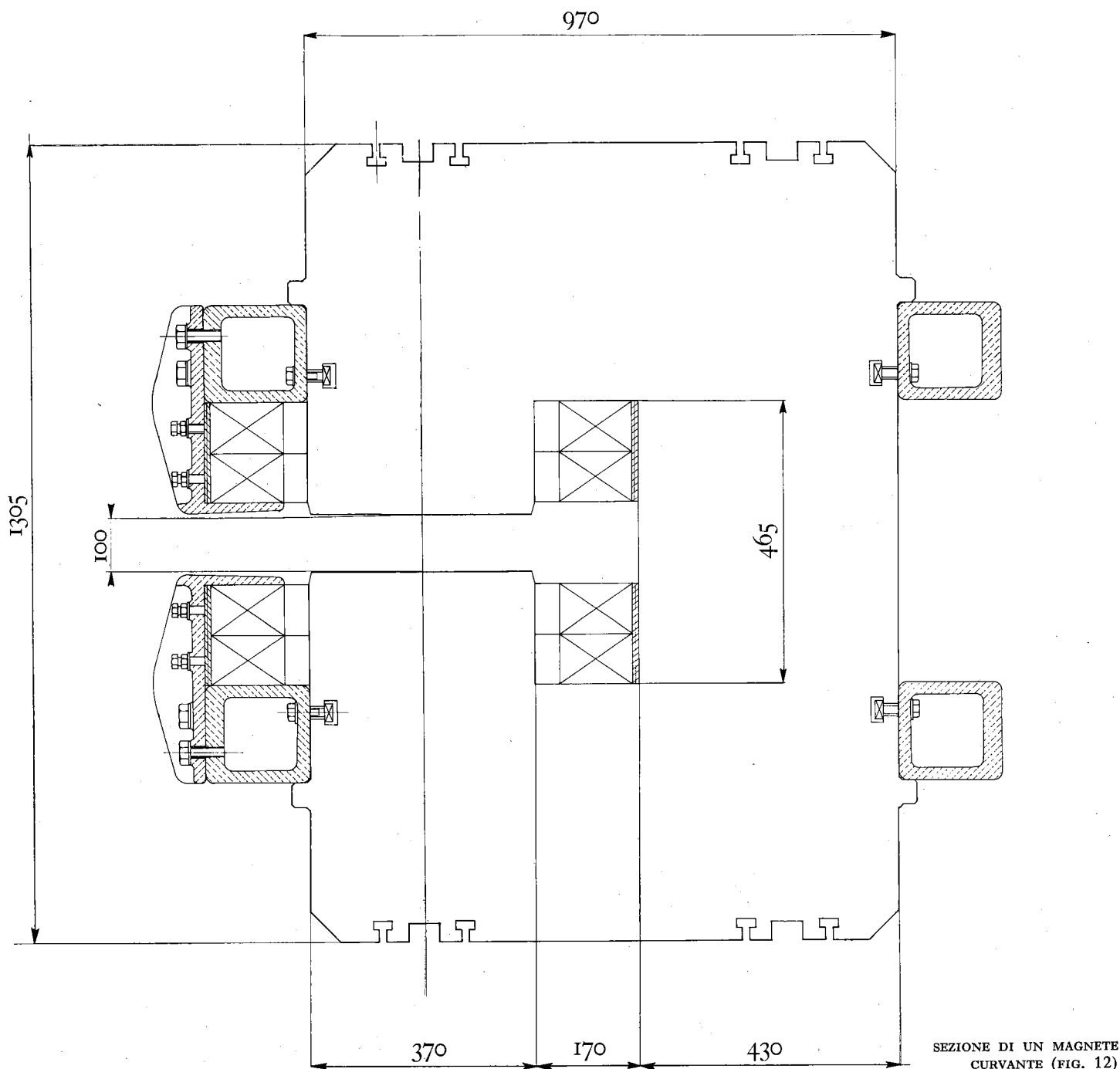
calcolata dall'osservatore in moto, moltiplicata per $\gamma = \frac{E}{mc^2}$.

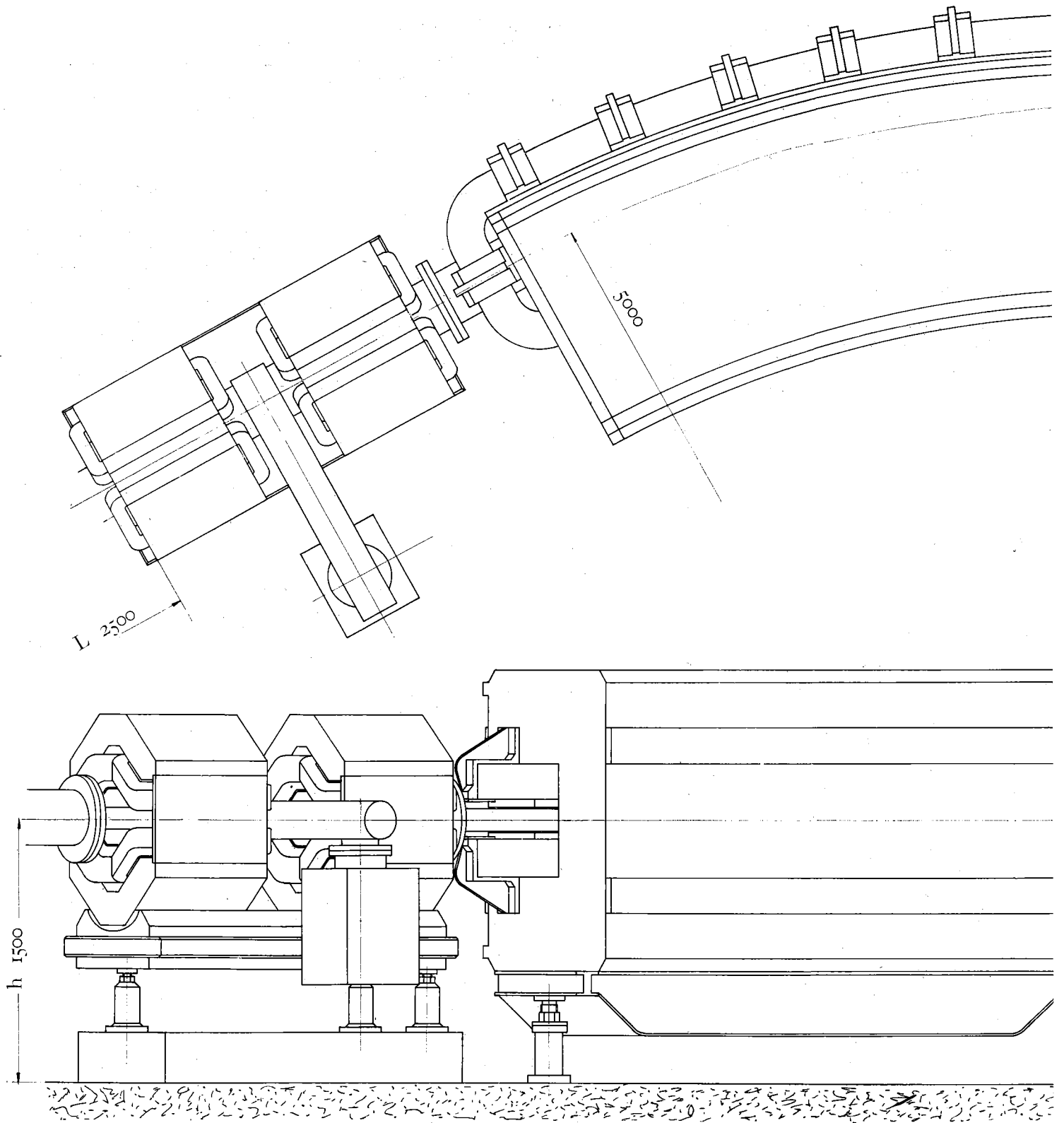
Di conseguenza anche piccoli trasferimenti di momento da trasverso a longitudinale portano a grosse variazioni di momento longitudinale, e quindi di energia; se tali variazioni sono maggiori dell'accettazione in energia delle cavità a radiofrequenza, le due particelle vengono perse. Questo effetto, noto come «effetto Frascati» o «effetto Touschek» per essere stato osservato ed interpretato per la prima volta in AdA (5), dipende in modo complesso dall'energia e dalla tensione delle cavità

a radiofrequenza; la vita media risulta inversamente proporzionale alla densità delle particelle in un pacchetto. In Adone, con $2 \cdot 10^{11}$ particelle per fascio, la vita media varia con l'energia tra 1 ora e 20 ore; i valori minori (che si hanno alle basse energie, e quindi all'iniezione) sono insufficienti e dovranno essere aumentati ingrandendo le dimensioni del fascio con opportuni accoppiamenti tra i due modi di oscillazione di betatrone, ciò che non presenta particolari difficoltà dato il particolare tipo di struttura magnetica scelta. Si prevede che occorra ottenere un aumento delle dimensioni verticali per un fattore circa 5, ciò che comporta un uguale fattore nella vita media.

Interazioni tra i due fasci - Ogni evento di annichilamento porta naturalmente alla scomparsa di un elettrone e di un positrone; non possiamo però classificare questi eventi tra le «perdite», in quanto essi sono lo scopo per cui viene costruita la macchina. Il loro numero è comunque estremamente basso, come già si è visto, tanto da non portare sensibili effetti sull'andamento nel tempo dell'intensità dei fasci.

Vi è però un tipo di interazione diretta tra i due fasci, la *bremstrahlung*, la cui sezione d'urto integrata sulle energie dei





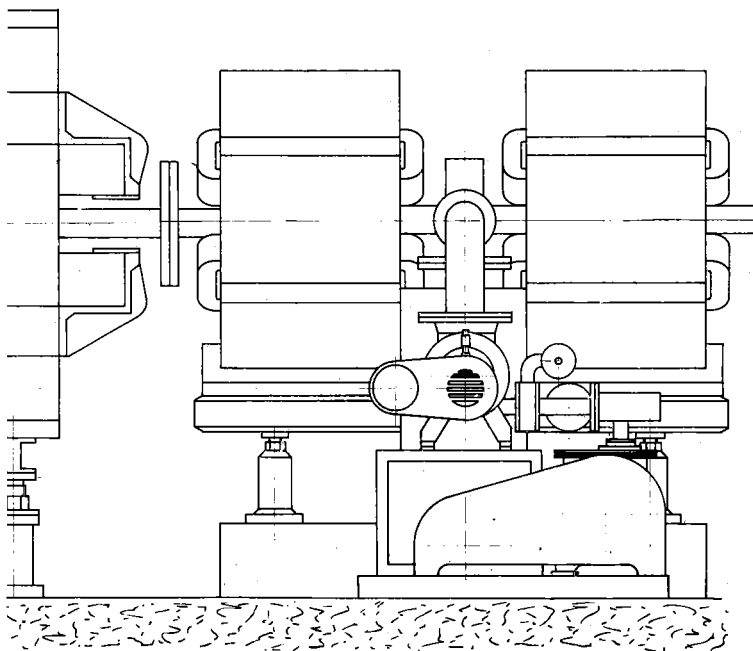
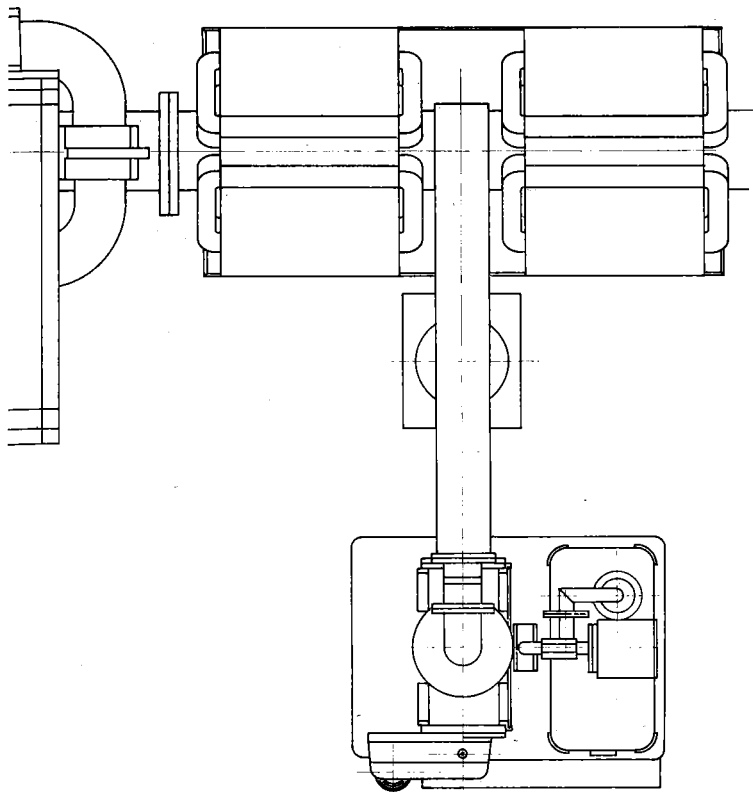
VISTA DI UN PERIODO DELL'ANELLO (FIG. 11)

fotoni emessi che portano alla perdita delle particelle è dell'ordine di 10^{-25} cm², molti ordini di grandezza maggiore quindi delle sezioni d'urto di annichilamento che abbiamo visto essere comprese tra 10^{-29} e 10^{-33} cm². Nel caso di Adone, con una luminosità di 10^{34} cm⁻² h⁻¹ ed un'intensità di $2 \cdot 10^{11}$ particelle per fascio, la vita media dovuta alla *bremstrahlung* fascio-fascio risulta essere circa 50 ore con due incroci e 17 ore con sei incroci.

Un altro processo che può portare alla perdita di particelle, dovuto ad un'interazione indiretta tra i due fasci, è lo *scattering* della luce di sincrotrone emessa da un fascio contro le particelle dell'altro fascio. Questo processo nel caso di Adone,

in cui la zona di incrocio tra i due fasci è in una sezione diritta, non dà luogo a grosse perdite; la vita media corrispondente è di circa 60 ore. La situazione è molto peggiore nel caso in cui si abbia incrocio nel campo magnetico dei magneti curvanti; se ciò avvenisse in Adone, la vita media per lo *scattering* della luce scenderebbe a 1,5 ore.

Concludendo l'esame dei vari processi che influenzano la vita media dei fasci in un anello di accumulazione, possiamo dire che, una volta ottenute certe condizioni (e cioè pressione residua nella camera da vuoto inferiore a 10^{-9} torr e tensione alle cavità acceleratrici maggiore di 150 kV), i due processi



che maggiormente limitano la vita media dei fasci sono lo scattering delle particelle in un pacchetto e la *bremstrahlung* fascio-fascio. In Adone si prevede di ottenere, in condizioni sperimentali, un tempo di dimezzamento dell'intensità dei fasci compresa tra 5 e 15 ore, a seconda dell'energia.

L'iniezione e l'accumulazione dei fasci nell'anello

Come si è già accennato più sopra, il sistema di iniezione deve permettere di iniettare successivi impulsi di carica nell'anello senza perturbare il fascio precedentemente accumulato.

Uno dei possibili sistemi consiste nel disporre un magnete pulsato che devia le particelle provenienti dall'iniettore in modo da farle entrare nell'anello tangenzialmente all'orbita principale e ad una certa distanza da essa; queste iniziano ad oscillare attorno all'orbita principale e, dopo un certo numero di giri (che dipende dal rapporto tra la frequenza di oscillazione e quella di rotazione, e che è dell'ordine di $3 \div 4$), ritornano nel punto in cui sono state iniettate.

Il magnete pulsato, detto anche deflettore, deve quindi avere una struttura aperta verso il centro della macchina; inoltre, al secondo passaggio delle particelle, il campo elettromagnetico che ha provocato la prima deflessione deve essere ridotto a zero, perché altrimenti le particelle vengono ulteriormente deflesse e perdute contro le pareti della ciambella.

Le perdite per irraggiamento provocano poi lo smorzamento delle oscillazioni intorno all'orbita di equilibrio, con una costante di tempo che è funzione dell'energia delle particelle e del campo magnetico nei magneti curvanti.

Dopo circa due costanti di tempo l'ampiezza delle oscillazioni sarà abbastanza ridotta da permettere un nuovo impulso di iniezione senza che il campo disperso del deflettore perturbi eccessivamente il fascio accumulato.

Altri metodi di iniezione, concettualmente più complessi, sono pensabili; tutti hanno però in comune il requisito di un elemento in cui vi sia un campo elettromagnetico rapidamente variabile nel tempo, se si vuole ottenere un rendimento di iniezione superiore al 10%.

Il numero di impulsi di iniezione necessario per accumulare $2 \cdot 10^{11}$ elettroni nell'anello non è molto elevato: dell'ordine di tre o quattro, cui corrisponde un tempo totale di accumulazione inferiore ai 10 s, essendo la costante di tempo di smorzamento all'energia di iniezione di 0,8 s.

Diversa è la situazione per i positroni, la cui intensità, all'uscita dell'iniettore, è circa $1/250$ rispetto all'intensità degli elettroni; occorreranno quindi circa 1000 impulsi per accumulare $2 \cdot 10^{11}$ positroni in un tempo pari a circa 30'.

Tenuto conto del tempo necessario per la conversione dell'iniettore da elettroni a positroni e per i necessari aggiustamenti dell'energia, il tempo totale per l'accumulazione è previsto essere compreso tra 1 ora e 1,5 ore.

Durante tutto il processo di accumulazione il campo magnetico nei magneti curvanti ed il gradiente nei quadrupoli è mantenuto costante al valore corrispondente all'energia delle particelle in uscita dall'iniettore; al termine i fasci vengono portati all'energia voluta variando opportunamente il campo magnetico nei magneti e nei quadrupoli. Le cavità acceleratrici, sempre in funzione per rifornire l'energia perduta per irraggiamento, provvedono all'accelerazione o decelerazione delle particelle. È facile vedere che, per variazioni non troppo rapide nel tempo (dell'ordine di un secondo dall'energia minima alla massima), l'energia che deve essere rifornita od assorbita per giro dalle cavità è inferiore ai 500 eV, trascurabile quindi rispetto ai $150 \div 250$ keV, che rappresentano l'energia massima che può essere ceduta od assorbita dalle cavità.

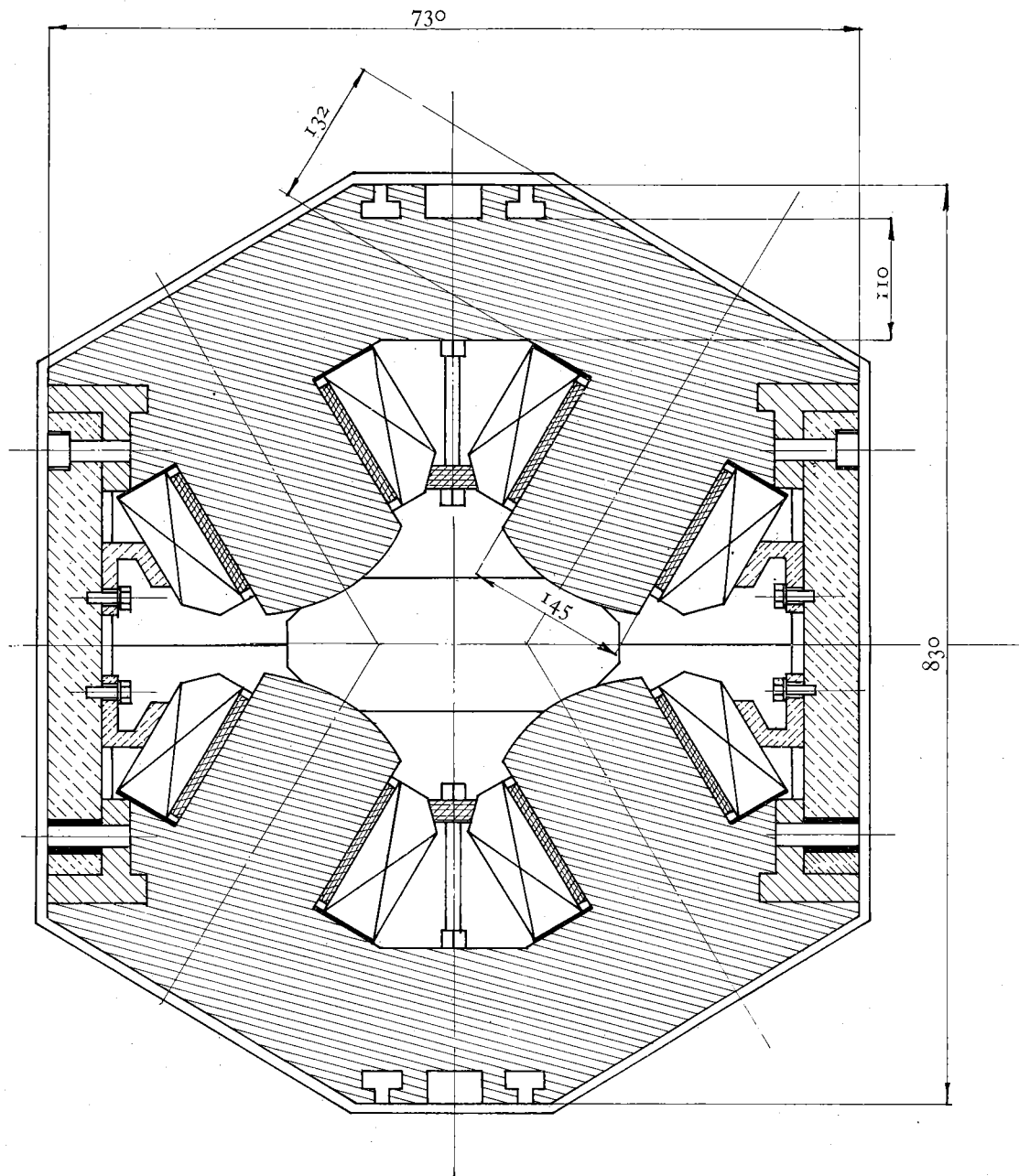
La struttura magnetica

La struttura scelta per l'anello è a foccheggiamento forte e a funzioni separate; è cioè composta di magneti curvanti con basso valore di gradiente ($n = 0,5$) e di quadrupoli.

Questo tipo di struttura, che, sotto certi aspetti, è più complessa delle strutture tradizionali a foccheggiamento forte, presenta due notevoli vantaggi, per l'applicazione agli anelli di accumulazione:

la possibilità di cambiare le caratteristiche del foccheggiamento durante il funzionamento variando le correnti nei quadrupoli) permette di cercare quei valori che rendono massima la luminosità a parità di intensità; come è mostrato in (20) infatti la densità trasversa a cui iniziano gli effetti di carica spaziale è funzione delle caratteristiche del foccheggiamento;

i tre modi di oscillazione (di betatrone radiale e verticale e di sincrotrone) sono smorzati (21-22), a differenza di quanto avviene in un foccheggiamento forte convenzionale; se poi



SEZIONE DI QUADRUPOLO (FIG. 13)

l'indice di campo dei magneti curvanti è $n = 0,5$ le tre costanti di smorzamento non dipendono dalle proprietà foccheggianti della struttura.

I quadrupoli sono riuniti in doppietti, per rendere meno critico l'allineamento, e l'elemento foccheggiante radiale è più vicino alle sezioni diritte.

Le sezioni diritte sono notevolmente lunghe, 2,5 m, per permettere l'installazione delle apparecchiature sperimentali per rivelare gli eventi di annichilamento; a differenza di quanto avviene con le macchine acceleratrici convenzionali, dove la sperimentazione avviene normalmente su fasci secondari o sul fascio accelerato ed estratto dalla macchina, in un anello di accumulazione gli eventi interessanti avvengono nell'anello stesso, all'incrocio tra i fasci.

La necessità di disporre di sezioni diritte molto lunghe e la struttura a funzioni separate fanno sì che le dimensioni complessive della macchina risultino alquanto maggiori di quelle di acceleratori convenzionali per la stessa energia (circa un fattore 2,5 sul raggio medio dell'orbita); occorre naturalmente tener presente che, a compenso di tali maggiori dimensioni, un anello di accumulazione non richiede sale sperimentali.

L'INIETTORE E L'OTTICA DI INIEZIONE

L'iniettore è un acceleratore lineare in banda S, progettato appositamente per l'accelerazione di positroni (23).

Esso è attualmente in costruzione da parte di una ditta, la *Varian Associates* (U.S.A.), per conto del Consiglio Nazionale delle Ricerche, e ne è previsto il montaggio a Frascati nell'estate del 1965.

L'acceleratore lineare è composto di due sezioni con caratteristiche assai diverse: la sezione ad alta corrente può accelerare una corrente di elettroni di 420 mA ad un'energia di 65 MeV; la sezione ad alta energia può dare 280 MeV ad un fascio di 100 mA, e 350 MeV ad un fascio di intensità trascurabile (≤ 1 mA).

Per la produzione ed accelerazione dei positroni il fascio di elettroni al termine della sezione ad alta corrente è focalizzato su un convertitore spesso (≈ 1 lunghezza di radiazione di W); una lente adattatrice, con lunghezza focale molto corta, raccoglie una frazione dei positroni prodotti nello sciame, aventi un'energia vicina all'energia critica (circa 10 MeV), che vengono poi accelerati nella sezione ad alta energia. Per aumentarne l'accettazione trasversa, la sezione ad alta energia è circondata

da un solenoide che produce un campo magnetico assiale di 2,4 kG.

Un calcolo accurato dell'intensità di positroni ottenibile alla fine del linac e dello spettro in energia di tale corrente è praticamente impossibile, perché per far ciò occorrerebbe risolvere le equazioni del moto nel campo elettrico presente nelle guide acceleratrici, senza ricorrere alle solite approssimazioni (consistenti essenzialmente nel considerare nullo lo spessore delle iridi che caricano la guida).

Calcoli approssimati (23-24) indicano che la corrente di positroni accelerata dovrebbe essere maggiore di $300 \mu\text{A}$, nell'ipotesi che la zona utile per l'accelerazione sia pari al 75% del diametro delle iridi e che il fascio di elettroni sul convertitore sia di 420 mA a 65 MeV; per le efficienze di conversione si sono usati i dati sperimentali ottenuti a Saclay e ad Orsay (25-26).

La corrente di positroni così calcolata ha però una dispersione in energia maggiore della dispersione che può essere accettata nell'anello; la corrente utile per l'iniezione, nelle ipotesi già dette, risulta essere di circa $100 \mu\text{A}$.

Nella tabella II sono raccolte le caratteristiche principali dell'acceleratore lineare.

L'acceleratore lineare non sarà però usato solo come iniettore, ma anche per la sperimentazione diretta con i fasci di elettroni e positroni da esso accelerati. Per questa ragione la frequenza di ripetizione degli impulsi è maggiore di quella richiesta per l'iniezione, ed è la massima compatibile con i klystron usati.

Dal linac partono quindi tre canali magnetici: due di essi, uno al termine della sezione ad alta corrente, ed uno al termine della sezione ad alta energia, portano i fasci di elettroni a bassa energia ed alta intensità e di elettroni e positroni ad alta energia in due sale che saranno opportunamente attrezzate per la sperimentazione; un terzo porta i fasci di elettroni e di positroni verso l'anello.

Quest'ultimo canale, composto di magneti e di lenti quadrupolari ed il cui ultimo elemento è il deflettore impulsato, deve essere tale da far sì che siano soddisfatti tre requisiti:

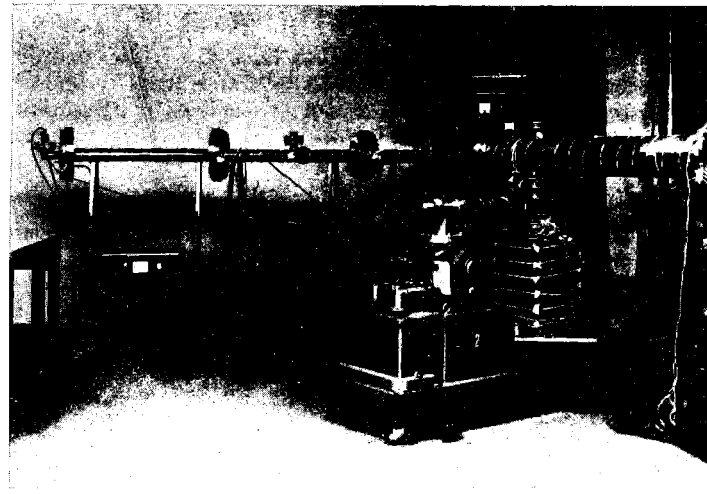
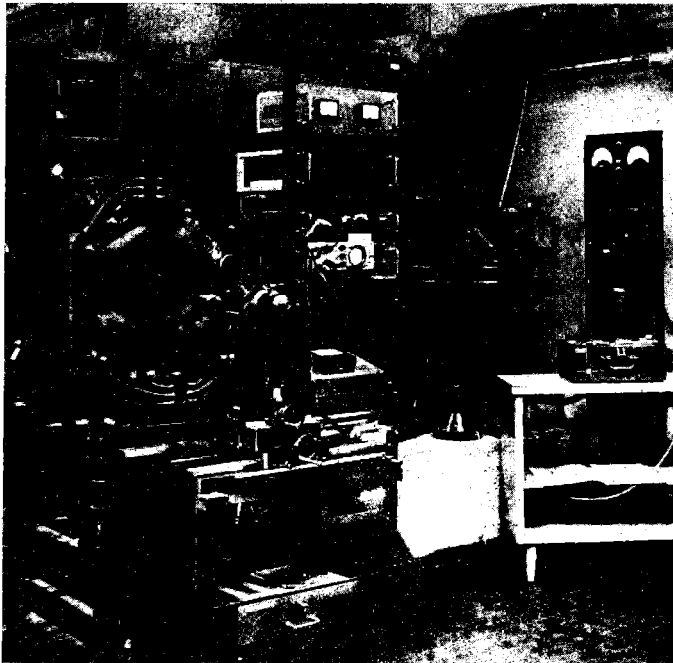
i fasci debbono arrivare nelle sezioni diritte di iniezione tangenti all'orbita principale;

il sistema di trasporto deve essere acromatico, non deve cioè introdurre correlazioni tra l'energia delle particelle e la loro posizione od il loro angolo all'ingresso nell'anello;

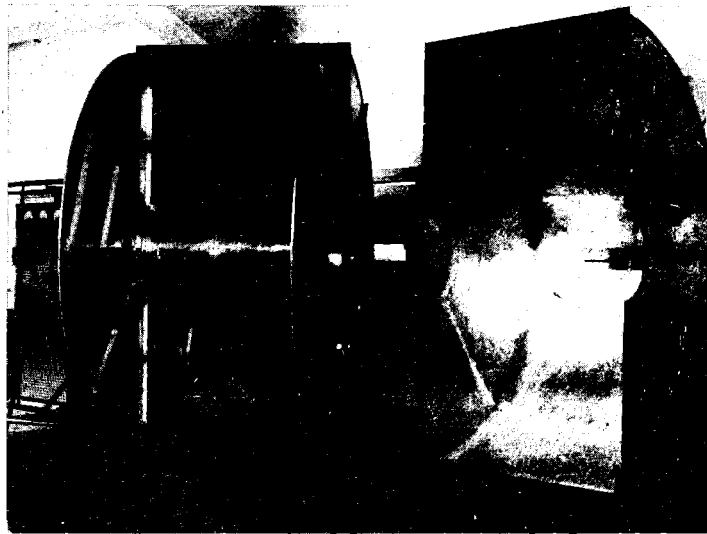
l'emittanza trasversa dei fasci all'ingresso nell'anello deve avere una certa forma definita, adattata all'accettazione dell'anello.

In figura 8 è rappresentato uno schema dell'ottica di iniezione.

MODELLI DEL MAGNETE
E DEL QUADRUPOLO (FIG. 14)

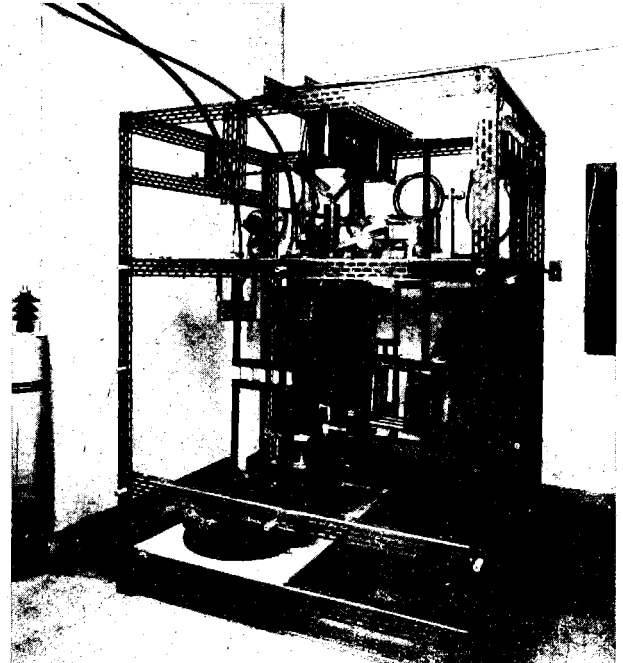


MODELLO DI UNITÀ DEL SISTEMA DI VUOTO -
PARI A 1/24 DELLA LUNGHEZZA
COMPLESSIVA DELL'ANELLO (FIG. 15)



MODELLO DI CAVITÀ RISONANTE
(FIG. 16)

MODELLO DI AMPLIFICATORE DI POTENZA
A R.F. (FIG. 17)



Il deflettore è costituito da una linea di ritardo quadrifilare, caricata con capacità per abbassarne l'impedenza caratteristica. Esso deve deflettere di 0,13 rad gli elettroni e i positroni da 375 MeV provenienti dall'iniettore; per ottenere ciò, su una lunghezza di 1,8 m, occorre un campo magnetico di circa 900 G, uniforme entro l'1% su una sezione trasversa di circa 1 cm × 1 cm. La durata dell'impulso, corrispondente a quattro giri delle particelle nell'anello, risulta essere di 1,4 μs ed i tempi di salita e di discesa della corrente debbono essere brevi rispetto al periodo del giro, inferiori od al più uguali a 100 ns.

Il modello in scala 1 : 1 per le prove a bassa potenza è mostrato in figura 9: esso è stato realizzato dopo uno studio preventivo della struttura in vasca elettrolitica e su di esso sono state eseguite una serie di misure elettriche e magnetiche a bassa potenza (27).

L'impedenza caratteristica è di 9,9 Ω, con VSWR ≤ 1,1 sino a frequenze di 30 Mc/s, ed il tempo di riempimento misurato (su una lunghezza di 1,2 m) è di 45 ns. Questi valori e l'andamento del campo, misurato con alimentazione sinusoidale a varie frequenze tra 0,1 e 10 Mc/s, concordano molto bene con i valori calcolati e quelli misurati in vasca elettrolitica.

La corrente necessaria per ottenere un campo di 900 G risulta essere di 9.000 A, e quindi la tensione sul deflettore di 90 kV e la tensione di carica della linea formatrice di 180 kV.

La linea formatrice è un cavo; l'interruttore una *spark-gap*; il carico adattato, che deve essere in grado di sopportare una potenza di picco di 800 MW ed una potenza media di 10 kW, sarà realizzato con resistenze speciali in bagno d'olio.

I problemi tecnologici posti da questo tipo di deflettore impulsato sono certamente difficili da risolvere; una soluzione con ferrite (1) (28), che presenta notevoli vantaggi dal punto di vista elettrico, è stata presa in considerazione, ma successivamente scartata per le difficoltà che essa introduce per il sistema da vuoto.

LA STRUTTURA MAGNETICA

Come già accennato, la struttura magnetica è a foccheggiamiento forte e funzioni separate; le figure 10 e 11 rappresentano una pianta schematica dell'anello ed una vista di un elemento periodico (1/12).

L'apertura utile dei magneti curvanti e dei quadrupoli è di 22 cm radialmente e 8 cm verticalmente; essa è utilizzata completamente all'iniezione; mentre nelle fasi successive sarebbe sufficiente un'apertura minore.

Per permettere una derivata massima del campo rispetto al tempo di 10 kG/s, senza intollerabili perturbazioni dovute alle correnti parassite, il magnete e i quadrupoli saranno realizzati in lamierino di ferro dolce dello spessore di 1,5 mm.

La struttura meccanica dei magneti curvanti è convenzionale (fig. 12); quella dei quadrupoli presenta invece due caratteristiche nuove (fig. 13): essi non sono a simmetria cilindrica intorno all'asse ottico e non hanno gioghi di ritorno verticali, per evitare masse di materiale ad alto numero atomico vicino alle zone sperimentali e ciò allo scopo di diminuire i fondi dovuti alle cascate elettromagnetiche.

Notevolmente stringenti sono le tolleranze di costruzione e le precisioni di allineamento (29); le dimensioni del traferro dei vari elementi debbono essere uniformi entro 0,05 mm, e i vari elementi debbono essere allineati lungo l'orbita ideale con scarti inferiori a 0,5 mm. Sono già state effettuate delle prove di allineamento con strumenti ottici tradizionali (30); i risultati ottenuti mostrano che le precisioni richieste possono essere ottenute.

Sono stati costruiti e provati modelli dei magneti curvanti (in scala 1 : 2) e dei quadrupoli (in scala 1 : 1); essi sono mostrati in figura 14 insieme con le apparecchiature necessarie per le misure di campo magnetico.

La costruzione dei magneti e dei quadrupoli definitivi sarà effettuata da una ditta; sono già state richieste le offerte e l'assegnazione della fornitura dovrebbe avvenire nel prossimo futuro. Il tempo di consegna sarà dell'ordine di 24 mesi; nei primi mesi del 1966 si dovrebbe quindi essere in grado di montare la struttura magnetica nella sua sede definitiva.

Il sistema di alimentazione sarà composto di tre generatori in c.c. indipendenti: uno per i magneti curvanti, uno per i quadrupoli foccheggianti e uno per i quadrupoli defoccheggianti. Assai stringenti sono i requisiti di stabilità nella corrente erogata, per poter sfruttare l'elevata risoluzione in energia propria di una macchina a fasci incrociati: occorre una stabilità di circa 5 · 10⁻⁴, con la possibilità di registrare il valore istantaneo della corrente (o del campo magnetico) con una sensibilità dell'ordine di qualche 10⁻⁵.

IL SISTEMA DI VUOTO

Nella camera da vuoto si deve mantenere, durante il funzionamento, una pressione residua inferiore a 10⁻⁹ torr.

L'impianto è composto di 24 pompe ioniche, con una velocità di pompaggio di 400 l/s ciascuna; 12 pompe turbomolecolari, con velocità di pompaggio di 140 l/s ciascuna, sono previste per il degassamento della camera da vuoto.

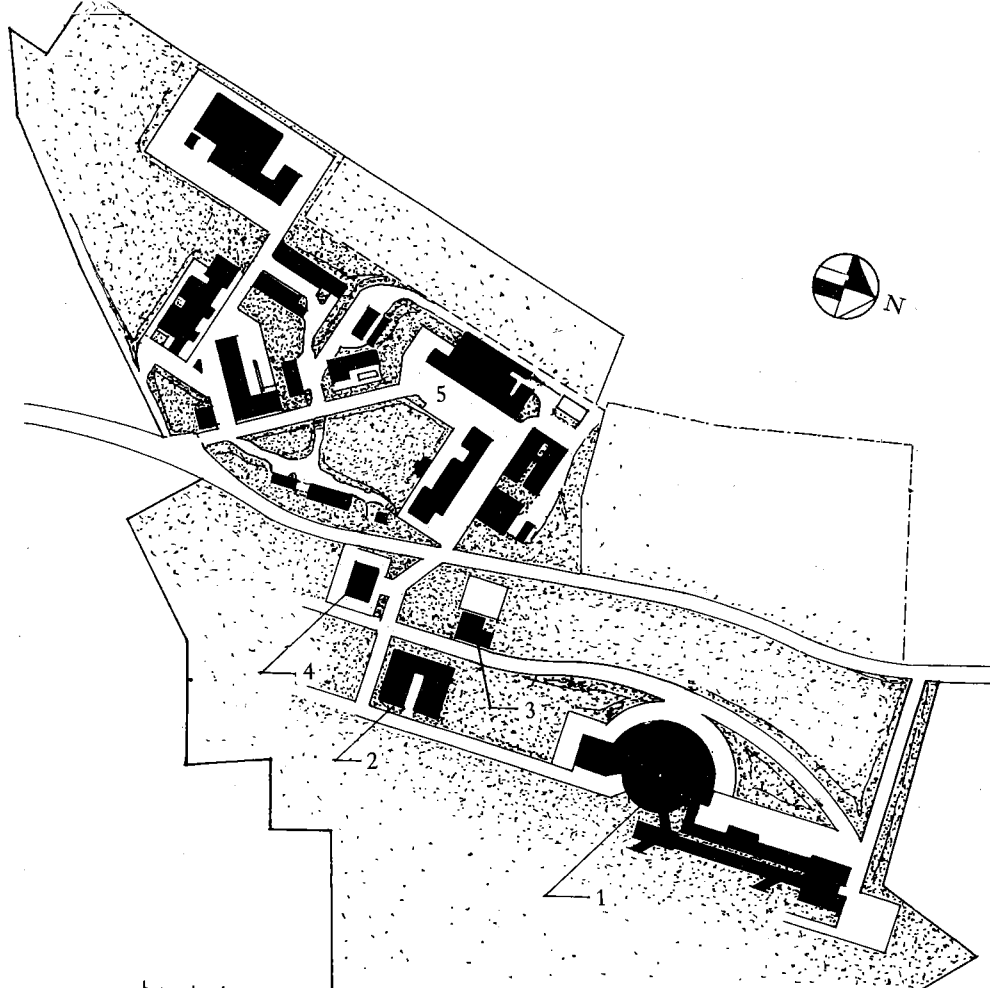
CARATTERISTICHE DELL'ACCELERATORE LINEARE

Tabella II

		Elettroni	Positroni
Energia, per corrente $i < 1$ mA	MeV	440	360
Energia, per corrente $i = 100$ mA	MeV	375	
Corrente massima di picco	mA	100	∞ 0,3
Corrente di picco entro $\Delta p/p = 1\%$	mA	25	∞ 0,1
Durata dell'impulso: max	μs		
min	μs	3,2	
		< 0,01	
Frequenza di ripetizione:			
per durata dell'impulso $> 0,1$ μs	Hz	250	
per durata dell'impulso $\leq 0,1$ μs	Hz	700	
Duty cycle del fascio, max		8 · 10 ⁻⁴	
Sezione ad alta corrente:			
Energia, per corrente $i < 1$ mA	MeV	105	
Energia, per corrente $i = 420$ mA	MeV	65	
Corrente massima di picco	mA	420	

PIANTA DEI LABORATORI NAZIONALI
DI FRASCATI (FIG. 18)

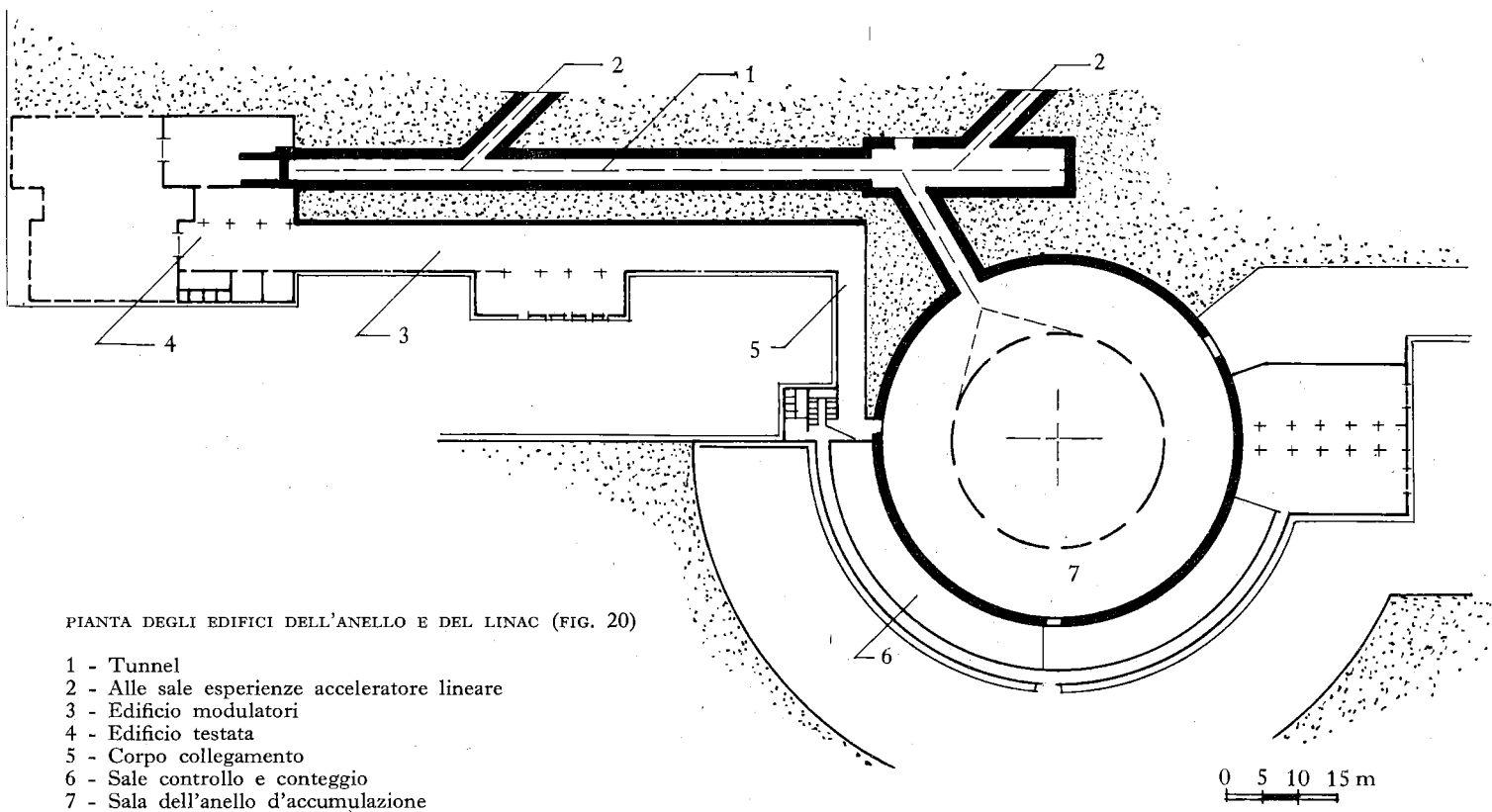
- 1 - Adone
- 2 - Laboratori Adone
- 3 - Cabina elettrica
- 4 - Magazzino centrale
- 5 - Zona sincrotrone



0 30 50m

VEDUTA AEREA
DEL NUOVO TERRENO
NEL LUGLIO 1963 (FIG. 19)





PIANTA DEGLI EDIFICI DELL'ANELLO E DEL LINAC (FIG. 20)

- 1 - Tunnel
- 2 - Alle sale esperienze acceleratore lineare
- 3 - Edificio modulatori
- 4 - Edificio testata
- 5 - Corpo collegamento
- 6 - Sale controllo e conteggio
- 7 - Sala dell'anello d'accumulazione

Le pompe saranno connesse alla camera da vuoto in corrispondenza dei quadrupoli, come mostrato in figura 11.

La camera da vuoto sarà in acciaio inossidabile tipo AISI 304, con guarnizioni in rame; la lunghezza sarà di circa 100 m, e la sezione trasversa all'incirca ellittica, con semiassi di 11 cm e 4,5 cm, negli elementi magnetici, e circolare, con diametro di 22 cm, nelle sezioni diritte.

Essa va sottoposta a particolari trattamenti, elettrochimici e termici, per diminuire la quantità di gas rilasciata dalle pareti per unità di tempo, e quindi rendere possibile il raggiungimento di un vuoto ultra spinto.

Questi trattamenti sono stati provati su un'unità del sistema da vuoto, rappresentata in figura 15; in essa è stata mantenuta, per un periodo di circa tre mesi, una pressione residua di $\approx 2 \div 3 \cdot 10^{-10}$ torr. È interessante notare che, dopo un primo trattamento termico a 400°C, con rientro di idrogeno e poi di aria nel sistema, si è ottenuta la pressione residua sopra menzionata dopo un secondo trattamento termico a soli 150°C. Ciò è molto importante, perché permette di limitare a valori abbastanza bassi la temperatura di riscaldamento sul sistema completamente montato, evitando quindi di dover ricorrere ad isolamenti termici complessi attorno alla camera da vuoto che evidentemente richiederebbero dimensioni maggiori per gli elementi della struttura magnetica (magneti curvanti e quadrupoli).

IMPIANTO A RADIOFREQUENZA

Le cavità acceleratrici a radiofrequenza debbono essere in grado di rifornire ai fasci circolanti un'energia massima pari a 250 keV per giro (31-32).

Le cavità sono due, a doppia *gap*, in aria: in corrispondenza di ciascuna delle due *gap* di una cavità la camera da vuoto in acciaio inossidabile è interrotta da un tratto isolante in allumina, che deve sopportare 65 kV.

Un modello della cavità risonante è rappresentato in figura 16; in figura 17 è mostrato il prototipo dell'amplificatore finale di potenza usato per le prove sulla cavità.

L'impianto a radiofrequenza deve avere un funzionamento sicuro; un'interruzione della tensione nelle cavità, per tempi

dell'ordine di 50 μ s o più, porta alla perdita dei fasci accumulati. Per questa ragione nel progetto dell'impianto si sono tenuti larghi margini di sicurezza.

Un unico pilota a 8,9 Mc/s alimenta le due catene di amplificazione; l'ultimo stadio, direttamente accoppiato ad una delle due cavità, può trasferire al carico 80 kW a radiofrequenza. La larghezza della banda in cui la risposta dell'amplificatore è costante entro l'1% è 1 Mc/s. I quattro stadi amplificatori di ogni catena lavorano in classe B1 (con corrente di griglia trascurabile) in modo che la modulazione d'ampiezza può essere effettuata ad ogni livello di potenza.

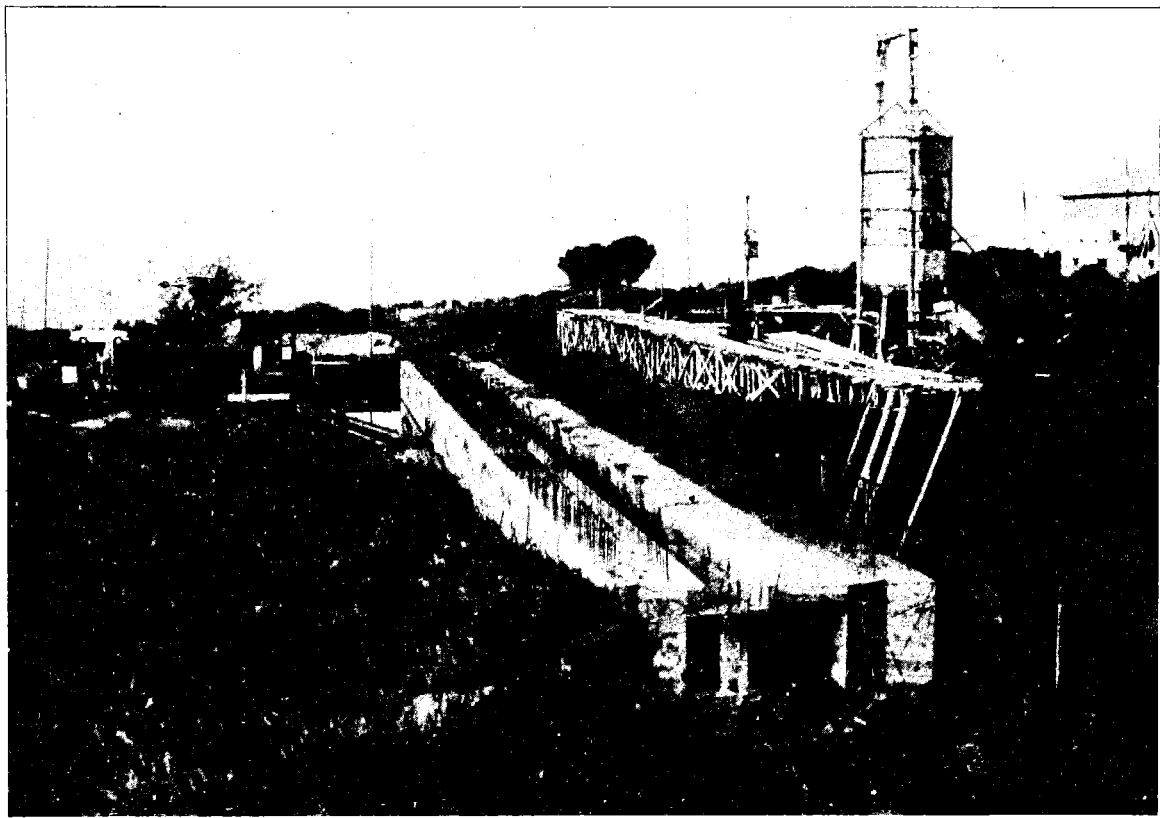
GLI EDIFICI

Il complesso Adone verrà installato su un'area adiacente a quella ove attualmente sorgono i Laboratori Nazionali di Frascati; la figura 18 mostra una pianta del nuovo terreno, con la sistemazione degli edifici per l'anello e per l'acceleratore lineare, di due laboratori, della cabina di trasformazione 60/3 kV-10 MVA e di un nuovo magazzino centrale. La figura 19 è una veduta aerea del terreno, ripresa il 10 luglio 1963: si possono vedere gli scavi per l'acceleratore lineare quasi terminati e l'inizio dello scavo per l'edificio dell'anello; in alto a destra è l'attuale complesso dei Laboratori di Frascati.

La figura 20 mostra una pianta degli edifici: il tunnel dell'acceleratore lineare è circondato da uno spessore di 5 m, tra terra e calcestruzzo, per schermatura contro le radiazioni; a fianco del tunnel corre l'edificio modulatori, nel quale sono installate tutte le apparecchiature di alimentazione e di controllo dell'acceleratore. Il banco di comando è situato nella sala controllo dell'edificio dell'anello, insieme coi banchi di comando dell'anello.

Questa sala controllo, insieme con la sala conteggio, è sopraelevata rispetto al piano dell'anello.

Attualmente si sta lavorando agli edifici dell'acceleratore lineare, il cui montaggio avrà inizio nei primi mesi del 1965: come mostra la figura 21 (ripresa agli inizi di dicembre 1963) sono state completate le fondazioni del tunnel e i pilastri di appoggio dell'acceleratore.



SITUAZIONE DEI LAVORI
PER IL TUNNEL DEL LINAC
AL DICEMBRE 1963
(FIG. 21)

BIBLIOGRAFIA

- (1) BARBER W. C. et al.: *An experiment on the limits of quantum electrodynamics - Stanford University*, Report HEPL 170, 1959.
- (2) BERNARDINI C. et al.: *The Frascati Storage Ring*, «Nuovo Cimento», 18, 1293, 1960.
- (3) BERNARDINI C. et al.: *Progress Report on Adone (Frascati Storage Ring)*, «Nuovo Cimento», 23, 202, 1962.
- (4) BERNARDINI C. et al.: «Proc. Int. Conf. Brookhaven, 1961», pag. 256.
- (5) BERNARDINI C. et al.: «Phys. Rev. Letters», 10, 407, 1963.
- (6) BERNARDINI C. et al.: *Lifetime and beam size in electron storage rings* - Nota Int. dei Lab. Naz. di Frascati, L.N.F. 63/63, 12 settembre 1963.
- (7) AMMAN F. et al.: *Anello di accumulazione per elettroni e positroni* - Nota Int. dei Lab. Naz. di Frascati, L.N.F. 61/5, 27 gennaio 1961.
- (8) AMMAN F. et al.: *Proposta per la realizzazione di un anello di accumulazione per elettroni e positroni da 1,5 GeV* - Nota Int. dei Lab. Naz. di Frascati, L.N.F. 61/65, 7 dicembre 1961.
- (9) AMMAN F., RITSON D.: «Proc. Int. Conf. Brookhaven 1961», pag. 262.
- (10) AMMAN F. et al.: *Gli anelli di accumulazione per elettroni e positroni ad alta energia in progetto presso i Laboratori Nazionali di Frascati*, «Ricerca Scientifica», 32, 1, 1962.
- (11) AMMAN F. et al.: *Comunicazione al Congresso della S.I.F. - Bologna 1962*, «Nuovo Cimento», 29, 1963.
- (12) AMMAN F. et al.: *Elementi di progetto di un anello di accumulazione per elettroni e positroni da 750 MeV* - Nota Int. dei Lab. Naz. di Frascati, L.N.F. 63/34, 7 maggio 1963.
- (13) AMMAN F. et al.: *Stato di avanzamento del progetto Adone* - Nota Int. dei Lab. Naz. di Frascati, L.N.F. 63/47, 142, 1963.
- (14) AMMAN F. et al.: *Status report on the 1,5 GeV electron positron storage ring-Adone* - Nota Int. dei Lab. Naz. di Frascati, L.N.F. 63/62, 10 settembre 1963.
- (15) CABIBBO N., GATTO R.: *Theoretical Discussion of Possible Experiments with Electron-Positron Colliding*, «Nuovo Cimento», 20, 185, 1961.
- (16) CABIBBO N., GATTO R.: *Electron-Positron Colliding Beam Experiments*, «Phys. Rev.», 124, 1577, 1961.
- (17) DRELL S. D.: «Annals of Physics», 4, 75, 1958.
- (18) BELL J. S. et al.: *Comunicazione alla Conferenza di Siena sulle particelle elementari*, settembre 1963.
- (19) AMMAN F., RITSON D.: *Space charge effects in electron-electron and positron-electron colliding or crossing beam rings* - «Proc. of the Brookhaven Int. Conf. on High Energy Accelerators», 1961, pag. 471.
- (20) BASSETTI M.: *Calcoli numerici sugli effetti di carica spaziale in un anello di accumulazione per elettroni e positroni* - Nota Int. dei Lab. Naz. di Frascati, L.N.F. 62/35, 5 maggio 1962.
- (21) PELLEGRINI C.: *A Calculation of Radiation Effects on Electron Oscillations in a Circular Accelerator*, «Suppl. Nuovo Cimento» 22, 603, 1961.
- (22) PELLEGRINI C.: *Non linear effects on the damping constants of electron oscillations in a Synchrotron* - Nota Int. dei Lab. Naz. di Frascati, L.N.F. 62/96, 21 novembre 1962.
- (23) AMMAN F., ANDREANI R.: *L'acceleratore lineare per elettroni e positroni* - Nota Int. dei Lab. Naz. di Frascati, L.N.F. 63/46, 1 luglio 1963.
- (24) FERLENGHI E., MANGO L.: *Calcoli per l'ottica di trasporto dei positroni nell'acceleratore lineare di Frascati* - Nota Int. dei Lab. Naz. di Frascati, L.N.F. 63/70, 12 novembre 1963.
- (25) BERNARDINI M. et al.: *Mésure du rendement de conversion négaton-positon* - Nota Int. dei Lab. Naz. di Frascati, L.N.F. 62/66, 2 agosto 1962.
- (26) AGGSON T. L., BURNOD L.: *Production de positron à l'accelerateur d'Orsay. Determination de la section efficace à 0° sur cible et paisses-* «Lab. d'Orsay, Report LAL», 27 ottobre 1962.
- (27) MASSAROTTI A., PUGLISI M., TAZZIOLI F.: *Studio del deflettore di Adone* - Nota Int. dei Lab. Naz. di Frascati, L.N.F. 63/72, 28 novembre 1963.
- (28) KUIPER B., PLASS G.: *On the fast extraction of particles from a 25 GeV proton synchrotron* - «C.E.R.N. Report», 59/30, 24 agosto 1959.
- (29) MANGO L.: *Effetto degli errori negli elementi della struttura magnetica di una macchina acceleratrice a funzioni separate* Nota Int. dei Lab. Naz. di Frascati», L.N.F. 64/1 (in corso di pubblicazione).
- (30) CATTONI A., EUGENI E., MARRA A.: *Prove preliminari per l'allineamento di Adone* - Nota Int. dei Lab. Naz. di Frascati, L.N.F./Int/Ad, 63/5.
- (31) FABIANI D., MASSAROTTI A., PUGLISI M., TAZZIOLI F.: *Impianto a radiofrequenza per il progetto Adone 1500 MeV* - Nota Int. dei Lab. Naz. di Frascati, L.N.F. 63/53, 31 luglio 1963.
- (32) PUGLISI M.: *Effetto del carico elettronico sulle cavità risonanti delle macchine acceleratrici orbitali* - Nota Int. dei Lab. Naz. di Frascati, L.N.F. 62/23, 7 aprile 1962.