

Laboratori Nazionali di Frascati

LNF-61/65 (7. 12. 61)

F. Amman: PROPOSTA PER LA REALIZZAZIONE DI UN ANELLO DI
ACCUMULAZIONE, PER ELETTRONI E POSITRONI DA 1.5 GeV.

Laboratori Nazionali di Frascati del C.N.E.N.
Servizio Documentazione

Nota Interna: n° 105
7 Dicembre 1961

F. Amman, M. Bassetti, M. Bernardini, F. Catoni, G.F. Co
razza, R. Evangelisti, G. Garolla, C. Pellegrini, D. Rit
son^(x): PROPOSTA PER LA REALIZZAZIONE DI UN ANELLO DI AC
CUMULAZIONE PER ELETTRONI E POSITRONI DA 1.5 GeV.

rapporto a cura di F. Amman:
sul lavoro del gruppo di studio per Adone

(x) - del Massachusetts Institute of Technology - ospi-
te dei Laboratori Nazionali di Frascati nel I se-
mestre dell'anno 1961.

PROPOSTA PER LA REALIZZAZIONE DI UN ANELLO DI ACCUMULAZIONE, PER ELETTRONI E POSITRONI, DA 1.5 GeV.

1) Introduzione.

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

Due fasci di particelle cariche, accelerate alla stessa energia (nell'ipotesi che la loro massa sia la stessa), vengono fatti collidere frontalmente, o con angoli sufficientemente piccoli (dell'ordine di qualche grado, o meno): in queste condizioni il sistema del baricentro delle particelle interagenti coincide col sistema del laboratorio; e quindi l'energia fornita alle particelle dei due fasci è totalmente disponibile nelle reazioni fra di esse.

La probabilità di ottenere un'interazione in un solo incrocio è estremamente piccola; si ricorre quindi a macchine circolari, dette appunto anelli di accumulazione, in cui i due fasci vengono mantenuti su orbite ben definite, e, ad ogni giro, si incrociano una o più volte.

Nel caso di reazioni tra una particella in moto e una ferma, una parte più o meno grande dell'energia fornita a quella in moto da un acceleratore convenzionale non è disponibile per la reazione, perchè una parte di essa va spesa per conservare la quantità di moto del baricentro del sistema delle particelle interagenti.

Se consideriamo in particolare l'urto elettrone-po

sitrone, o elettrone-elettrone, ottenuto con acceleratori convenzionali (una particella in moto contro l'altra a riposo), si ha che l'energia nel baricentro, e quindi disponibile per la reazione, è di 30 MeV con un acceleratore da 1000 MeV, e di 140 MeV, con un acceleratore da 20 GeV: le stesse energie nel baricentro sarebbero ottenibili con anelli d'accumulazione da 15 MeV e 70 MeV rispettivamente.

Per poter poi disporre di 3 GeV nel baricentro, ciò che si ha con un anello da 1.5 GeV, occorrerebbe un acceleratore convenzionale da 9000 GeV.

Per questo tipo di esperienze gli anelli di accumulazione di energia superiore ai 200 MeV sono quindi equivalenti ad acceleratori convenzionali di enorme energia, tale da poter essere considerati irrealizzabili.

Nel 1956, alla Conferenza Internazionale sugli Acceleratori per Alte Energie, tenuta a Ginevra, venne per la prima volta presentata la possibilità di ricorrere alla sperimentazione con fasci incrociati; si parlò allora di studiare l'urto elettrone-elettrone e protone-protone.

Seguì un progetto di un anello per elettroni da 500 MeV, che venne costruito presso l'Università di Stanford (U.S.A.), e che entrerà probabilmente in funzione agli inizi del prossimo anno; scopo di esso è lo studio dei limiti di validità dell'elettrodinamica.

Si iniziò poi, al CERN, a studiare la possibilità di realizzare degli anelli di accumulazione per protoni da 25 GeV.

Agli inizi del 1960 il Prof. Touschek dell'Università di Roma propose la costruzione di un anello per elettroni e positroni; con esso si può studiare, in condizioni particolarmente favorevoli sia per la misura che per l'interpretazione dei risultati, la produzione delle particel-

le elementari già note nell'annichilamento elettrone positrone; esso è inoltre, uno degli strumenti più adatti per l'identificazione di nuove particelle.

Dato l'estremo interesse di questa proposta, per la vastità del campo di sperimentazione originale che un tale strumento avrebbe aperto, presso i laboratori di Frascati si iniziò la costruzione di un anello, per elettroni e positroni, da 250 MeV, chiamato convenzionalmente Ada.

Scopo principale di Ada era lo studio del processo di accumulazione e dei vari elementi che determinano la vita di una particella carica in un anello; si sapeva sin dall'inizio che molto difficile sarebbe stato l'ottenere le intensità richieste per la sperimentazione con esso, usando il fascio γ dal sincrotrone da 1000 MeV per produrre gli elettroni e i positroni da accumulare.

Ada entrò in funzione nel maggio del 1961 e sinora ha dato molte utili informazioni sul funzionamento degli anelli di accumulazione a bassa intensità.

Il programma di lavoro di Ada proseguirà e vi è la speranza di poterne aumentare l'intensità almeno sino a poter misurare gli annichilamenti in due γ di un elettrone e un positrone, reazione che ha la sezione d'urto più grande tra quelle di annichilamento.

Sarà però assai difficile ottenere in Ada delle intensità simili a quelle richieste in anelli più grandi; essenzialmente perchè ciò esula dagli scopi per cui venne costruita e quindi la struttura adottata non è la più favorevole a questo scopo.

Verso la fine del 1960 anche presso l'Università di Cornell venne iniziata la costruzione di un piccolo anello da 250 MeV, per elettroni e positroni, con le stesse possibilità e limitazioni di Ada.

Nulla si sa su analoghe iniziative nei laboratori russi.

Attualmente vi è quindi un piccolo anello per elettroni e positroni, Ada, funzionante a bassa intensità, ed un anello per soli elettroni da 500 MeV, a Stanford, che entrerà in funzione entro qualche mese.

L'interesse con cui sono state accolte, in varie Conferenze Internazionali; le nostre comunicazioni sugli anelli per elettroni e positroni rende però plausibile la ipotesi che in un prossimo futuro qualche altro laboratorio decida la costruzione di questo tipo di macchina.

Molto probabilmente, al termine dell'esperienza di scattering già progettata, l'anello di Stanford verrà trasformato in modo da permettere l'accumulazione di elettroni e positroni; si presume che ciò potrà avvenire tra tre o quattro anni.

Nel marzo del 1961 venne costituito a Frascati un gruppo incaricato di studiare le possibilità di realizzazione di un anello, per elettroni e positroni, da 1.500 MeV, e di giungere ad una proposta di massima per la sua costruzione.

Scopo di questo rapporto è appunto di presentare le conclusioni cui siamo giunti in questo lavoro preliminare ed insieme gli elementi di massima per un progetto.

Come sempre avviene nello studio di un nuovo tipo di macchine, non tutte le sue caratteristiche possono essere previste dal calcolo con sufficiente accuratezza; per alcune di esse si possono ottenere solo dei limiti superiori ed inferiori, piuttosto che dei valori ben definiti.

In queste condizioni un progetto dovrebbe essere redatto tenendo conto dei limiti più pessimistici, oppure si dovrebbero determinare sperimentalmente gli elementi in

certi, ricorrendo a dei modelli.

Noi riteniamo che, nel nostro caso, la soluzione più conveniente sia di arrivare alla realizzazione di un anello da 1500 MeV passando per una fase intermedia consistente nella costruzione di un anello da 750 MeV; esso può essere considerato sia come una macchina progettata e costruita con un largo margine di sicurezza, che come un modello completo dell'anello più grande, che potrebbe poi, per l'esperienza già fatta, essere costruito con margini di sicurezza molto più ristretti.

I due anelli avrebbero in comune l'iniettore, che si vedrà essere il più costoso dei singoli componenti la macchina, o almeno parte di esso.

La maggiore spesa di questa soluzione, rispetto a quella comportante un unico anello da 1500 MeV, risulta essere pari all'incirca alla metà del costo totale dell'anello da 750 MeV; i due anelli sarebbero naturalmente costruiti in modo da poter funzionare contemporaneamente, e ciò è possibile perchè l'iniettore verrebbe usato da ciascun anello per una piccola parte (circa il 10%) del tempo totale.

Lo sforzo costruttivo verrebbe maggiormente ripartito nel tempo, ma il primo anello da 750 MeV sarebbe a disposizione dei fisici per la sperimentazione entro circa tre anni dall'inizio di tale programma, ed inoltre esso consentirebbe una sperimentazione in condizioni migliori per i processi che si svolgono ad energie inferiori a 1000 MeV.

Dopo aver anticipato così, nelle sue linee generali, quale è la nostra conclusione, passiamo ad esaminare brevemente quali debbono essere i requisiti di un anello di accumulazione, i principi di funzionamento e le caratteristiche di alcune sue parti.

Prima di chiudere la parte introduttiva, va ricor dato che, a causa della minore flessibilità, nell'uso per la sperimentazione, di un anello di accumulazione rispetto ad un acceleratore convenzionale, parallelamente al grup po incaricato dello studio della macchina, è stato costituito un gruppo di fisici incaricati di progettare alcune esperienze tipo.

Primo risultato della collaborazione tra questi due gruppi è stata la definizione dei requisiti della macchina.

2) Requisiti.

In sede di progetto di massima, allo sperimentato re interessano essenzialmente due caratteristiche di un anello di accumulazione: l'energia dei fasci e la frequen za di eventi utili.

Come si è detto più sopra, oggetto principale del nostro studio è stato un anello da 1500 MeV; a scopo di confronto abbiamo però anche considerato energie minori.

L'interesse fisico di questa macchina è tanto mag giore quanto più vasto è il campo della sperimentazione con essa possibile, e quindi quanto più è alta la sua e nergia. Prenderemo in esame, in quanto segue, quattro va lori di energia tipici di quattro campi di ricerca progres sivamente più ricchi di possibilità sperimentali; esso sono:

- a) 450 MeV: permette la produzione di coppie di μ e di π e, in particolare, l'esame completo della risonanza $\pi\pi$;
- b) 750 MeV: è vicino al massimo della sezione d'urto per turbativa per la produzione di coppie di mesoni K;
- c) 1100 MeV: corrisponde al massimo della sezione d'urto perturbativa per la produzione di coppie di nucleoni;
- d) 1500 MeV: permette la produzione in coppie di tutte le

particelle elementari conosciute, inclusi gli iperoni.

La frequenza di eventi utili, \dot{n} , è funzione della sezione d'urto dell'evento voluto e di un parametro L , che chiameremo luminosità dei fasci all'incrocio, che dipende dalle caratteristiche della macchina. Calcolati che siano, con opportune ipotesi, i valori prevedibili delle sezioni d'urto, e fissata la frequenza minima accettabile di eventi utili, se ne deduce il valore che deve assumere la luminosità, e, di qui, le caratteristiche dell'anello da cui essa dipende. La frequenza di interazione \dot{n} e la luminosità L sono date dalle relazioni:

$$1) \quad \dot{n} = L \quad \sigma \text{ sec}^{-1}$$

$$2) \quad L = \frac{f}{K} \cdot \frac{N_+ N_-}{S} \quad \text{cm}^{-2} \quad \text{sec}^{-1}$$

dove: σ , in cm^2 , è la sezione d'urto dell'evento in considerazione;

f , in sec^{-1} , è la frequenza di rotazione degli elettroni e dei positroni nell'anello;

K è l'armonica del sistema a radiofrequenza;

$N_+(N_-)$ è il numero totale di positroni (elettroni) presente nell'anello;

S , in cm^2 , è la sezione trasversa efficace di incrocio dei due fasci: nel caso di collisione frontale e di completa sovrapposizione dei fasci all'incrocio, essa è uguale alla loro sezione trasversa, nel caso invece di incrocio con un angolo diverso da zero, essa è molto maggiore della sezione trasversa, dipende dall'angolo di incrocio e cresce con esso.

In fig. 1 sono riportate, in funzione dell'energia, le sezioni d'urto totali, in approssimazione perturbativa,

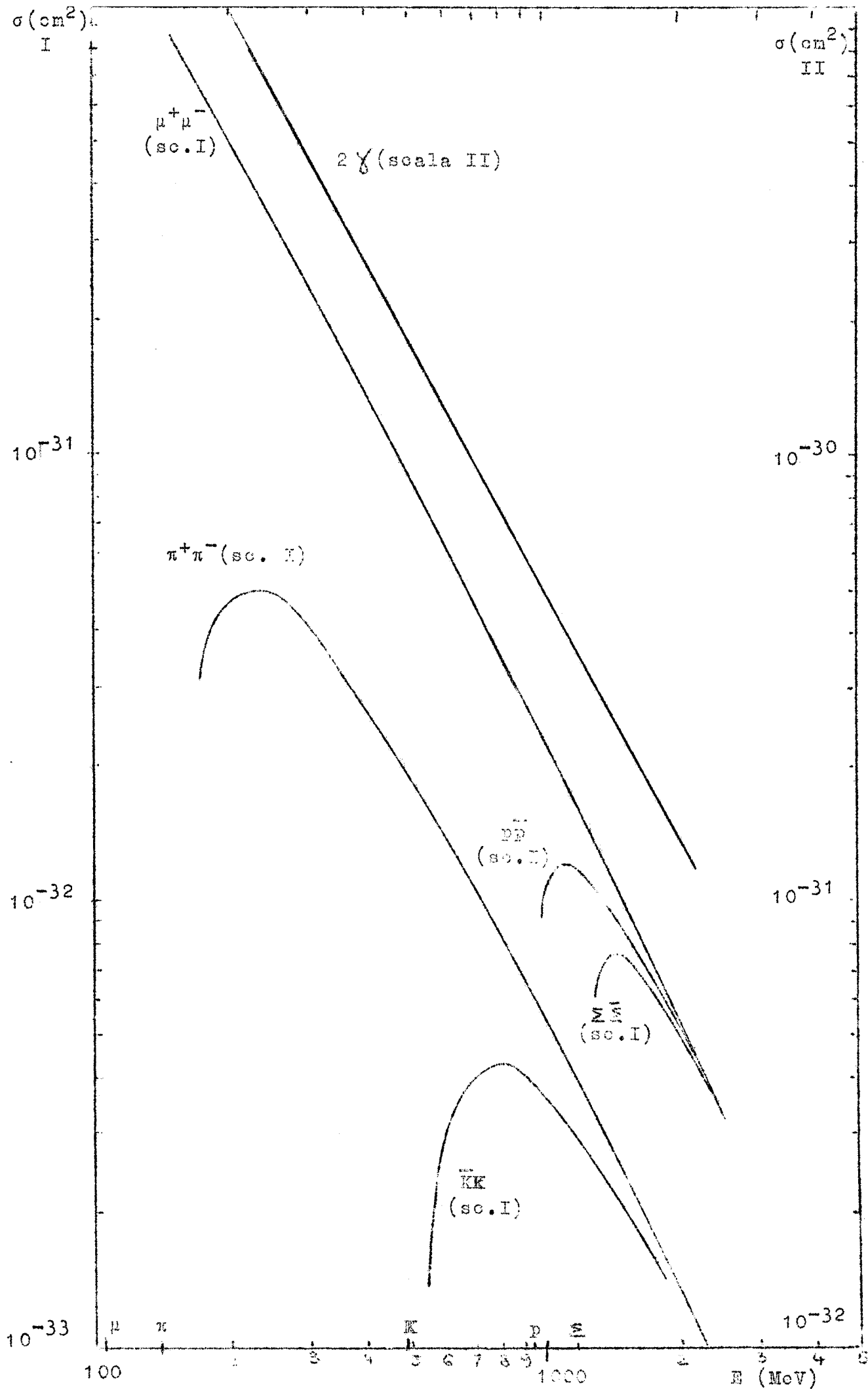


FIG. 1 - SEZIONI D'URTO PERTURBATIVE
 (Gatto - nota interna n° 91)

per alcune delle più importanti reazioni che possono essere studiate con un anello di accumulazione; si può vedere che, per energie abbastanza maggiori dei valori di soglia, esse sono proporzionali a E^{-2} , essendo E l'energia.

Il valore limite per la luminosità dovrebbe essere quindi anch'esso funzione dell'energia; per semplicità si è assunto come dato di partenza un unico valore L_0 che deve essere raggiunto almeno in corrispondenza dell'energia massima dell'anello; L_0 è stato scelto con particolare riferimento all'anello da 1500 MeV ed è:

$$3) L_0 \cong 3 \times 10^{29} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1} \cong 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ h}^{-1}$$

Lo stesso valore di luminosità, per energie inferiori a 1500 MeV, darebbe naturalmente delle frequenze di eventi utili maggiori, dato che le sezioni d'urto, previste con calcolo perturbativo, sarebbero maggiori.

3) Funzionamento e componenti di un anello di accumulazione.

Nelle sue linee generali un anello di accumulazione è simile ad un sincrotrone: esso è composto di un iniettore, di un sistema ottico di iniezione, di un magnete, di un tubo a vuoto spinto posto nelle espansioni polari del magnete, di un sistema a radiofrequenza il cui compito è di rifornire ai fasci circolanti l'energia persa per irraggiamento; gli elettroni e i positroni, accelerati nell'iniettore, vengono iniettati in molti impulsi successivi nella "ciambella" sinchè viene raggiunta l'intensità totale voluta: terminato il processo di accumulazione, i due fasci vengono lasciati circolare e inizia l'osservazione degli eventi di annichilamento elettrone-positrone

nelle zone di incrocio.

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

Poichè si vuole che il tempo utile per la sperimentazione sia lungo rispetto al tempo necessario per il processo di accumulazione, che assumiamo essere dell'ordine di $30' + 60'$, tale costante di tempo, o vita media del fascio, dovrà essere dell'ordine di $10 + 20$ ore. Per ottenere ciò occorre che la pressione del gas residuo in ciambella sia di circa 10^{-9} mmHg. A intervalli di tempo regolari viene poi ripetuto il processo di accumulazione per riportare la intensità dei fasci al valore iniziale.

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

Per quanto riguarda la struttura foccheggiante del magnete, per energie superiori a circa 800 MeV il foccheggiamento forte risulta più vantaggioso del foccheggiamento debole; quest'ultimo è certamente più conveniente alle bas

se energie.

In un anello d'accumulazione non possono però essere adottate le strutture a foccheggiamento forte usate nei sincrotroni, perchè con esse si ha eccitazione delle oscillazioni radiali di betatrone (in connessione con le perdite di energia per irraggiamento) con conseguente perdita del fascio.

Questo problema, già studiato in precedenza da altri, è stato da noi riesaminato a fondo, e riteniamo ora possibile, senza complicare eccessivamente la struttura del magnete, superare tale difficoltà.

L'impianto a radio frequenza, in media, rifornisce l'energia perduta per irraggiamento; la sua tensione deve essere però tale da poter rifornire un'energia maggiore, di un fattore $1.5 + 2$ nel caso di foccheggiamento forte, e $2 + 4$ nel caso di foccheggiamento debole.

Dato che le perdite per irraggiamento sono proporzionali al cubo dell'energia, a pari valore di campo magnetico, le difficoltà di realizzare il sistema a radio frequenza dipendono molto dall'energia massima dell'anello.

Nella tabella I sono indicate le tensioni a radio frequenza richieste e l'energia perduta per irraggiamento per i valori di energia massima considerati.

Per le parti sinora esaminate, componenti l'anello di accumulazione propriamente detto, si può affermare quindi che i problemi da risolvere sono qualitativamente più o meno gli stessi di quelli che si incontrano nella realizzazione di un sincrotrone convenzionale; la principale differenza è quantitativa: il vuoto deve essere circa 1000 volte meglio che in un sincrotrone convenzionale, la radio frequenza deve funzionare senza alcun disturbo (scariche in cavità, mancanza di alimentazione anche per tem

ENERGIA IRRAGGIATA PER GIRO E TENSIONE DI RADIOFREQUENZA
 RICHIESTA.

TABELLA I

Energia max anello (MeV)	Energia irragg. per giro (Kev/giro)	Tensione R.F. foccheggiamento debole (kV)	Tensione R.F. foccheggiamento forte (kV)
450	2.45	10.5	--
750	11.5	36	25
1100	35.4	92	60
1500	90	200	130

pi molto brevi etc.) per un periodo dell'ordine delle decine di ore, da confrontarsi con gli usuali periodi di accelerazione che possono andare da 0,01 sec a 1 sec, e così via.

Riteniamo quindi che la realizzazione dell'anello propriamente detto, con le caratteristiche di cui si è parlato, non presenti difficoltà di principio: si tratta di migliorare le tecniche sin qui usate, ma non di percorrere strade completamente nuove.

Può darsi che la realizzazione di qualche componente richieda un tempo maggiore del previsto, per la mancanza di esperienza, sia nostra che dell'industria, ma un in successo in questa parte è assai improbabile.

Abbiamo considerato brevemente le caratteristiche dell'anello propriamente detto; dei requisiti esaminati nel par. 2, solo l'energia massima entra nella loro determinazione.

Prima di passare a considerare l'iniettore, le cui caratteristiche dipendono, come si vedrà, sia dall'energia dell'anello, che dalla luminosità che si vuole ottenere, occorre esaminare un fenomeno caratteristico delle macchine a fasci incrociati, che limita la densità efficace dei fasci in esse circolanti, e quindi impone dei vincoli sul modo di ottenere un dato valore di luminosità, e, contemporaneamente, dei limiti pratici sul valore ottenibile per tale grandezza.

4) Limitazioni di carica spaziale.

Il moto di una particella carica in una macchina acceleratrice è determinato, oltre che dal campo magnetico di guida e dal campo elettromagnetico a radiofrequenza, anche dalle forze agenti su di essa dovute alla presenza di altre particelle; queste forze, che dipendono dalla den

sità del fascio o dei fasci circolanti, vengono genericamente chiamate di carica spaziale.

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

Nel caso invece di un anello di accumulazione con due fasci incrociantisi, si trova che le forze di carica spaziale, dovute all'interazione elettromagnetica tra i due fasci, sono notevoli anche ad alta energia, e limitano le densità efficaci dei fasci stessi a valori piuttosto bassi.

Consideriamo un anello in cui vi siano circolanti N elettroni suddivisi in K pacchetti, la cui sezione trasversale efficace sia S , ed un positrone incrociante in p punti il fascio di elettroni; ad ogni incrocio il pacchetto di elettroni agisce sul positrone come una lente focogigante: se la lunghezza focale di questa lente diviene paragonabile ad una lunghezza caratteristica del sistema focogigante del magnete (pari al raggio di curvatura diviso per il numero di oscillazione di betatrone per giro), il positrone non oscilla più con ampiezza limitata intorno ad un'orbita stabile, ma tende ad allontanarsene indefinitamente.

Un effetto analogo si ha in ottica con una successione di lenti convergenti poste a distanza minore della somma delle distanze focali; il sistema viene ad essere equivalente ad una lente divergente.

Nel caso di instabilità sopra accennato, appena l'ampiezza di oscillazione del positrone diviene maggiore

della dimensione del fascio di elettroni, l'effetto diminuisce: il positrone tenderà quindi ad una situazione di regime con orbite che tenderanno ad essere limitate, ma esterne al fascio di elettroni, o comunque con una frequenza di incrocio con esso molto minore di $p f$, dove f è la frequenza di rotazione.

Si può calcolare, in una semplice approssimazione lineare, il valore limite della quantità N/KS per un fascio, e cioè il valore massimo della densità efficace per pacchetto, oltre il quale l'altro fascio diviene instabile: si ottiene:

$$4) \quad \frac{N}{KS} \approx \frac{Q \delta Q}{2p r_e} \frac{\chi}{R}$$

dove: Q è il numero di oscillazioni di betatrone per giro;

δQ è la distanza di Q dalla più vicina risonanza;

p è il numero di incroci per giro;

r_e è il raggio classico dell'elettrone, $2,82 \times 10^{-13}$ cm

χ è l'energia delle particelle, in unità di massa di riposo;

R in cm, è il raggio medio dell'anello;

S in cm^2 , è la sezione trasversa efficace del fascio.

Esaminando la 4) si può vedere che, in corrispondenza dell'energia massima dell'anello, la densità trasversale efficace di carica per pacchetto dipende assai debolmente dai parametri dell'anello, almeno nel campo di energia considerato; infatti il prodotto $Q \delta Q$ potrà variare tra circa 0,20 e 0,60, a seconda che la macchina sia a foccheggiamento debole o foccheggiamento forte; χ/R è proporzionale al campo magnetico all'energia massima: il suo valore è limitato dalle proprietà magnetiche del ferro, e quindi in prima approssimazione non dipende dalle caratteristiche della macchina; in realtà χ/R può assumere dei valori

un poco maggiori con foccheggiamento debole che con foccheggiamento forte, e questo tende a compensare le variazioni nel prodotto $Qd\eta$.

Il numero di incroci, che naturalmente sarà scelto il minimo possibile, potrà variare tra 2 e 4 a seconda delle soluzioni.

Il valore che può assumere la densità efficace di carica per pacchetto, in corrispondenza dell'energia massima dell'anello, risulta compreso tra 3×10^{11} e 10^{12} el/cm².

Sostituendo la 4) nella 2), si ottiene la seguente espressione per la luminosità, sempre all'energia massima dell'anello:

$$5) \quad L \approx 2 + 6 \times 10^{30} I_+ \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$$

dove I_+ , in A, è la corrente circolante del fascio meno intenso.

La limitazione nella densità non pone quindi un limite al valore di L ottenibile, ma fa sì che esso dipenda linearmente dall'intensità del fascio meno intenso invece che dal prodotto delle intensità dei due fasci.

Per aumentare L bisogna aumentare sia N_+ che N_- e, proporzionalmente, anche la sezione trasversale efficace S, in modo da mantenere costante la densità.

Nel caso di anelli per elettroni e positroni un limite pratico nel valore di L è imposto dalla difficoltà di ottenere intensi fasci di positroni.

Ricordando il valore minimo di 3×10^{-29} cm⁻² sec⁻¹ che si vuole ottenere per la luminosità, dalla 5) si ha che l'intensità dei fasci di elettroni e positroni, indipendentemente dalla struttura dell'anello e dalla sua energia massima, dovrà essere di circa 100 mA.

Per gli elettroni questo valore non è certamente proibitivo, per i positroni invece esso presenta notevoli

difficoltà ed impone soluzioni molto costose.

Tutte le considerazioni fatte valgono, come si è detto, in corrispondenza dell'energia massima dell'anello E_{\max} ; per valori di energia E minori della massima, la densità limite risulterà minore per un fattore E/E_{\max} , dovuto alla dipendenza da γ/R . A pari corrente circolante anche la luminosità sarà quindi proporzionale a E/E_{\max} .

Non vi sono sinora dati sperimentali su questo effetto di carica spaziale; essendo esso dovuto all'incrocio di due fasci di particelle, essi potranno essere forniti solo da un anello di accumulazione funzionante con intensità abbastanza elevata.

Per quanto si può oggi prevedere, sarà difficile ottenere le intensità necessarie nel piccolo anello da 250 MeV già costruito, AdA; qualche informazione potrà invece venire dall'anello per elettroni di Stanford, poichè anche nel caso di incrocio di due fasci di elettroni si trova una limitazione nelle densità dei fasci stessi.

I risultati del calcolo della limitazione di carica spaziale, a causa delle semplificazioni necessariamente introdotte, potrebbero essere in errore, rispetto alla situazione reale, di un fattore $2 \div 3$; non è improbabile che il calcolo sia più pessimista della realtà.

5) L'iniettore.

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

Si può vedere che un iniettore che soddisfi tale requisito per il fascio di positroni, a maggior ragione lo soddisferà per il fascio di elettroni; consideriamo quindi il solo problema dei positroni.

Esaminiamo innanzitutto in maggior dettaglio il processo di iniezione e di accumulazione.

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

Il deflettore viene realizzato con un magnete a ferrite pulsato; il campo magnetico durante l'impulso deve essere costante entro l'1%, la durata dell'impulso è dell'ordine di $0,2 \pm 0,6 \mu\text{sec}$ (a seconda dell'energia massima dell'anello) e il suo tempo di salita deve essere breve rispetto al periodo di rotazione, breve cioè rispetto a $0,07 \pm 0,2 \mu\text{sec}$.

I positroni, iniettati ad una certa distanza dall'orbita principale di equilibrio, inizieranno ad oscillare intorno ad essa con grandi ampiezze; le perdite per irraggiamento provocano lo smorzamento di tali oscillazioni, con una costante di tempo τ , funzione dell'energia e del campo magnetico.

Dopo una costante di tempo l'ampiezza delle oscillazioni sarà ridotta di un fattore e , e sarà quindi possibile iniettare un nuovo impulso senza che il campo magnetico del deflettore pulsato perturbi il fascio già accumulato.

Tenendo conto che l'iniezione avviene su circa tre giri, e che il rendimento di cattura sarà intorno al 35%, si può concludere che l'incremento di corrente circolante per impulso di iniezione è circa uguale alla corrente di positroni i_+ , erogata dall'iniettore entro la banda di energia accettata dall'anello (circa $\pm 0,5\%$) e con un'emittanza inferiore a 10^{-3} rad cm.

Detta I_+ la corrente totale circolante voluta, M il numero di impulsi di iniezione necessari per accumulare tale corrente di un tempo T , varranno le seguenti relazioni:

$$6) \quad I_+ = M i_+$$

$$7) \quad T = M \tau$$

e, eliminando M:

$$8) \quad I_+ = \frac{T}{\tau} i_+$$

La costante di tempo di smorzamento τ dipende dalle caratteristiche dell'anello e dall'energia di iniezione E_{in} ; esplicitando queste dipendenze e sostituendo nella 8) si ha infine un'espressione che dà l'energia di iniezione (in GeV) in funzione di i_+ , I_+ , E_{max} (energia massima dell'anello in GeV), B_{max} (campo magnetico all'energia max, in kgauss):

$$9) \quad E_{in} = \left[0,5 \lambda \frac{I_+}{T i_+} \frac{E_{max}^2}{B_{max}^2} \right]^{1/3}$$

dove λ è il rapporto tra la lunghezza totale dell'orbita e la lunghezza dei settori magnetici curvanti: il valore di λ può variare tra 1.5 e 2.

In base alle considerazioni fatte in precedenza, possiamo fissare i valori di alcuni parametri che entrano nella 9), precisamente:

$$I_+ = 100 \quad \text{mA}$$

$$T = 1800 \quad \text{sec}$$

$$\lambda = 2$$

$$B_{max} = 10 \quad \text{kgauss}$$

con questi valori la 9) diviene:

$$10) \quad E_{in} \cong 0,8 \frac{E_{max}^{2/3}}{i_+^{1/3}}$$

La 10) è la relazione cercata, che fissa i parametri dell'iniettore, energia e corrente di picco di positroni, in funzione dell'energia massima dell'anello.

Chiaramente l'iniettore più conveniente è quello che rende massimo il prodotto $E_{in} i_+^{1/3}$ col minimo costo; questo prodotto può quindi essere assunto come fat

tore di merito dell'iniettore.

L'iniettore di positroni più conveniente risulta essere un acceleratore lineare composto di due parti: nella prima viene accelerato, sino ad un'energia di $20 + 30$ MeV, un fascio assai intenso di elettroni (con correnti di picco dell'ordine di $0,5$ A); essi vengono fatti urtare contro un convertitore, dando luogo ad una cascata elettromagnetica. Una frazione dei positroni così prodotti, opportunamente focalizzata con un sistema di lenti magnetiche, viene accettata dal secondo tratto di acceleratore lineare, che lo accelera sino alla energia finale E_{in} voluta.

Questa seconda parte di acceleratore lineare deve portare i positroni ad un'energia elevata, dell'ordine di alcune centinaia di MeV, ma in compenso la corrente da accelerare è molto bassa: la sua struttura è quindi diversa da quella del primo tratto.

Lo stesso iniettore viene naturalmente usato per accumulare gli elettroni: in questo caso viene tolto il convertitore, e gli elettroni vengono successivamente accelerati dalle due sezioni. Il valore di corrente così accelerato sarà limitato a circa 10 mA dalla potenza disponibile nel secondo tratto; esso comunque permette di accumulare i 100 mA di elettroni richiesti in un numero di impulsi che è sempre trascurabile rispetto a quello necessario per l'accumulazione dei positroni.

In fig. 2 è riportata in diagramma l'equaz. 10, e cioè l'energia E_{in} che deve fornire l'acceleratore lineare in funzione della corrente di positroni i_+ ottenibile al termine di esso, per i quattro valori dell'energia massima dell'anello E_{max} già considerati.

L'energia dell'acceleratore lineare necessario per un dato tipo di anello di accumulazione risulta quin

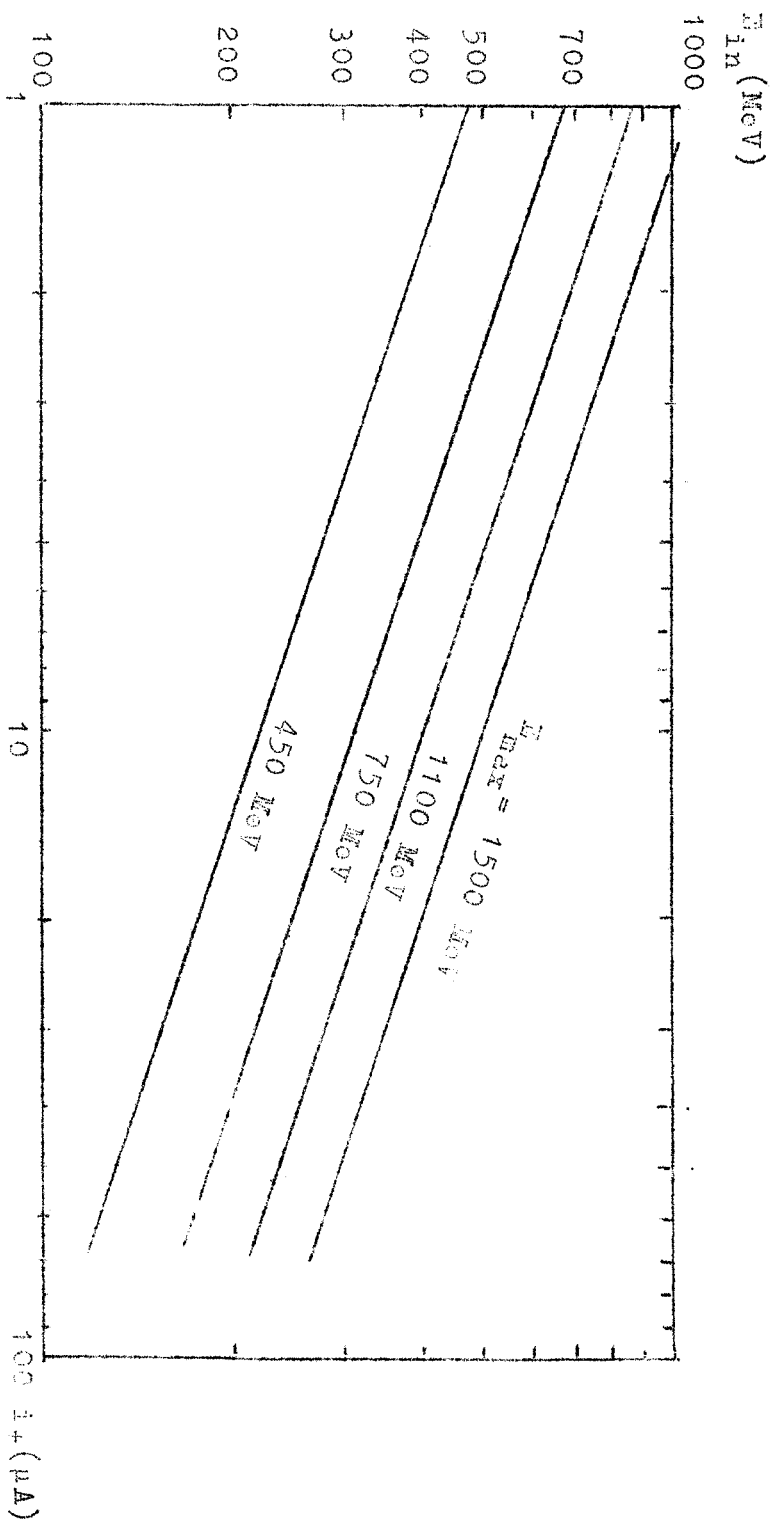


FIG. 2 - ENERGIA DI INIEZIONE IN FUNZIONE DELLA
CORRENTE DI POSIZIONE CHE SI RILEVA PER
INIESSO.

di determinata una volta nota la corrente di positroni che si può ottenere; il suo valore dipende dall'efficienza di conversione elettroni-positroni a bassa energia e dall'accettanza in angolo ed energia della sezione di acceleratore lineare successiva al convertitore.

La corrente di picco di positroni I_+ indipendentemente dall'energia dell'acceleratore lineare, potrà essere compresa tra 2 e 20 μA ; essa è limitata ad un certo valore massimo dal riscaldamento ammissibile nel convertitore durante l'impulso, e l'incertezza nel suo valore è dovuta all'incertezza con cui sono note sia l'efficienza di conversione che l'accettanza del linac.

Assumendo di poter ottenere $i_+ = 2 \mu A$, l'energia dell'iniettore per i quattro anelli di accumulazione già considerati risulta essere:

E_{max}	=	450 MeV	E_{in}	=	380 MeV
"	=	750 MeV	"	=	530 "
"	=	1100 MeV	"	=	700 "
"	=	1500 "	"	=	850 "

L'acceleratore lineare viene quindi ad assumere un peso notevole nel complesso, e, più che una parte di una macchina, è una grossa macchina esso stesso.

Va ricordato che al crescere dell'energia dell'acceleratore lineare, oltre al costo di esso, aumentano notevolmente anche le difficoltà connesse col sistema di iniezione, e, in particolare, col deflettore pulsato; poiché i campi magnetici che si possono ottenere con ferriti sono al più di $2 + 2.5$ kgs., un deflettore lungo 1 m dà un angolo di deflessione di circa 0,2 rad. a 400 MeV e circa 0,1 rad. a 800 MeV.

Si può dire che sino a 500 MeV non vi sono particolari difficoltà per l'iniezione, ma per energie superiori il problema diviene più complicato a causa dei pic-

coli angoli di deflessione che si possono ottenere.

6) Costi.

Nella tabella II vi è un prospetto dei costi per le quattro soluzioni considerate, nell'ipotesi che la corrente di positroni ottenibile dal linac sia di 2 μ A.

Il costo del linac è composto di due parti: una fissa di 350 milioni di lire, che comprende la sezione a bassa energia e alta corrente, e il sistema di conversione con relativa ottica; ed una proporzionale all'energia, in ragione di 100 milioni di lire per ogni 100 Mev.

Una parte del costo dell'edificio del linac è compresa nel costo del linac, ed è stata valutata in 30 milioni di lire per ogni 100 MeV, schermature incluse.

Sotto la voce "Anello" sono compresi tutti i costi relativi alla macchina, e le spese per il personale.

La voce "Edifici" si riferisce all'edificio in cui sarà posto l'anello di accumulazione, con tutti i servizi connessi, e alla prima parte dell'edificio del linac che è indipendente dalla soluzione adottata, quella cioè che ospita la sezione a bassa energia.

7) Conclusioni.

Come è già stato accennato nell'introduzione, in base agli elementi che sono stati qui brevemente esposti, abbiamo concluso che un anello di accumulazione per elettroni e positroni da 1500 MeV è realizzabile, e che il programma più conveniente per la costruzione comprende una fase intermedia consistente nella costruzione di un anello da 750 MeV.

Per quanto riguarda la possibilità di realizzazione, non ci sembra necessario aggiungere altro a quanto già esposto in precedenza.

TABELLA II -- COSTI.

Energia max anello (MeV)	Energia linac (MeV)	Costi (in miliardi di lire)				Totale
		Anello	Linac	Edifici		
450	380	0.50	0.85	0.25	1.60	
750	530	0.65	1.04	0.27	1.96	
1100	700	0.90	1.25	0.30	2.46	
1500	850	1.20	1.45	0.40	3.05	

Esaminiamo invece le ragioni che ci hanno portato a proporre un programma distinto in due fasi.

Abbiamo visto che vi sono due elementi, la cui influenza è determinante sulle caratteristiche dell'iniettore, che, attualmente, non sono definibili con sufficiente accuratezza: essi sono le limitazioni di carica spaziale e la corrente massima di positroni ottenibile da un acceleratore lineare. Un anello da 1500 MeV, progettato oggi con un certo margine di sicurezza, richiederebbe un acceleratore lineare da 850 MeV per poter ottenere il valore minimo di luminosità dato nel paragr. 2); l'eventualità di ottenere poi in pratica luminosità inferiori a quel valore minimo, per quanto scarsa, non può essere scartata a priori.

Ciò equivale a dire che il margine di sicurezza della macchina nel suo complesso è scarso. Per aumentarlo occorrerebbe prevedere un acceleratore lineare di energia ancora maggiore, ma in tal caso, oltre ad aumentare ulteriormente il costo del progetto, si andrebbe incontro a notevoli difficoltà tecniche nel sistema di iniezione.

Sembra quindi molto più ragionevole costruire prima un modello completo e funzionante, e, in base ai risultati ottenuti con esso, progettare e costruire l'anello da 1500 MeV.

Il modello non può però essere di energia inferiore a 200+300 MeV, a seconda che si voglia realizzarlo con struttura diversa da quello finale oppure uguale (la differenza dipende dal valore massimo del campo magnetico e dalla lunghezza delle sezioni diritte); ciò nell'ipotesi che la corrente di positroni sia di $2 \mu\text{A}$ e che si voglia accumulare 100 mA di positroni in 30'. L'energia dell'acceleratore lineare deve essere rispettivamente di 200 o 300 MeV.

Il costo di un tale modello e, soprattutto, il

tempo occorrente per la sua realizzazione sono tali da consigliare di costruirlo in modo che possa essere utilizzato per la sperimentazione, ed allora non si tratta più semplicemente di un modello, ma di una macchina vera e propria, le cui caratteristiche vanno scelte tenendo conto anche della sua possibile utilizzazione.

Noi riteniamo che l'energia più conveniente di questo primo anello sia intorno ai 750 MeV: considerando per ora il solo costo dell'anello e dell'edificio relativo (escluso cioè l'iniettore), esso non risulta molto diverso da quello di un anello da 300 MeV: la differenza può essere valutata in circa 300 milioni; la sperimentazione possibile con una macchina da 750 MeV rispetto ad una da 200+300 MeV, è tanto più vasta e interessante da giustificare questa maggiore spesa.

Il costo dell'iniettore non è stato considerato perchè esso verrebbe comunque usato in seguito come primo pezzo dell'iniettore per l'anello da 1500 MeV; per l'anello da 750 MeV occorre un acceleratore lineare da 500 MeV; è abbastanza probabile che tale energia si riveli in definitiva sufficiente anche per la seconda fase, che verrebbe così semplificata non richiedendo alcun cambiamento all'iniettore.

Dal punto di vista dei problemi connessi alla costruzione, non vi sono differenze sostanziali tra 300 e 750 MeV; l'anello da 750 MeV ha il vantaggio di poter essere realizzato con foccheggiamento forte e quindi di servire in modo più completo come modello per l'anello da 1500 MeV, ciò che sarebbe più difficile per quello da 300 MeV.

Le probabilità di successo delle due macchine da 300 e 750 MeV sono dello stesso ordine; in ambedue i casi il margine di sicurezza della macchina nel suo complesso è sufficientemente elevato.

Considerando infine il tempo necessario per la costruzione, essendo esso determinato dall'acceleratore lineare, non vi saranno sostanziali differenze tra le due soluzioni.

L'impegno finanziario del programma completo risulta essere di 3,656 miliardi di lire, qualora l'acceleratore lineare da 500 MeV sia sufficiente anche per l'anello da 1500 MeV, e di 4.106 miliardi di lire qualora esso, nella seconda fase, vada portato a 850 MeV; dovrebbe essere ripartito, negli anni finanziari che vanno dal 1961-62 al 1967-68, come indicato nella tabella III. Nella stessa tabella III vi è pure un quadro dei tempi per la costruzione delle due macchine.

Un'ultima considerazione relativa appunto ai tempi necessari per la costruzione: nel cercare quale fosse il programma più conveniente per portare a termine quest'impresa, abbiamo preferito le soluzioni che permettono di abbreviare quanto possibile il tempo previsto per la realizzazione di una macchina con cui possa essere iniziato un vasto programma sperimentale, e ciò perchè riteniamo abbastanza importante che i primi risultati scientifici con anelli di accumulazione per elettroni e positroni vengano ottenuti nei nostri Laboratori.

TABELLA III -

	1962	1962-1963	1963-1964	1964-1965	1965-1966	1966-1967	1967-1968
Iniettore							
Magnete e alimentazione							
Radiofrequenza e vuoto							
Obtusa iniez. Controlli							
Strumentazione							
Edifici							
Montaggio e prove							
IMPEGNI FINANZIARI (in milioni di lire)							
Iniettore	50	550	400		(300)	(150)	
Magnete e alimentazione	10	100	60	30	200	200	
Radiofrequenza e vuoto	15	40	70	60	75	90	50
Optica. Contr. Strum.	20	40	70	100	80	100	90
Edifici		100	170		170	230	
Personale	25	62	75	75	80	82	87
TOTALE imp. finanziari	120	892	845	265	605 (905)	702 (852)	227

----- progettazione

----- ordini e costruzione

Bibliografia

- G.K. O'Neill - The storage-ring synchrotron - CERN Symp. 1956 - I - pag. 64.
- G.K. O'Neill - Storage rings for electrons and protons - CERN Symp. 1959 - pag. 125.
- W.C. Barber, B. Richter, W.K.H. Panofsky, G.K. O'Neill, B. Gittelman - An experiment on the limits of quantum electrodynamics - Stanford Univ. - Report interno HEPL-170 Giugno 1959.
- C. Bernardini, G.F. Corazza, G. Ghigo, B. Touschek - The Frascati storage ring - Nuovo Cimento Ser. X, 18, 1293 (1960).
- H.G. Hereward, K. Johnsen, A. Schoch, C.I. Zilverschoon. - Feasibility of storage rings for the CERN PS - Comunicazione alla Conf. Internaz. di Brookhaven - 1961.
- N. Cabibbo, R. Gatto - Phys. Rev. Lett. 4, 313 (1960)
Nuovo Cim. 20, 184 (1961)
- N. Cabibbo, R. Gatto - On electron-positron colliding beam experiments - Labor. Naz. di Frascati - Nota interna n° 82. 26 giugno 1961.
- R. Gatto - On the experimental possibilities with colliding beams of electrons and positrons - Lab. Naz. di Frascati - Nota interna n° 91 - 1 settembre 1961.
- F. Amman, C. Bernardini, R. Gatto, G. Ghigo, B. Touschek - Un anello di accumulazione per elettroni e positroni (Adone). Labor. Naz. di Frascati - Nota interna n° 68 - 27 gennaio 1961.
- F. Amman - Preliminary considerations on a proposal for a e^+e^- colliding beam accelerator in the GeV region (Adone). Lab. Naz. di Frascati - Nota interna n° 79 - 6 giugno 1961.
- F. Amman, D. Ritson - Space charge effects in e^-e^- and e^+e^- colliding or crossing beam rings - Lab. Naz. di Frascati - Nota interna n° 86 - 24 luglio 1961.
- C. Pellegrini - A calculation of radiation effects on electron oscillations in a circular accelerator - Lab. Naz. di Frascati - Nota interna n° 90 - 1 settembre 1961.
- F. Amman, D. Ritson - Design of electron-positron colliding beam rings - comunicazione alla Conf. Internaz. di Brookhaven - 1961.