

Laboratori Nazionali di Frascati

LNF-62/88 (1962)

C. Bernardini, U. Bizzarri, G. Corazza, G. Di Giugno, G. Ghigo,
R. Querzoli, B. Touschek: L'ANELLO DI ACCUMULAZIONE "ADA"
PER ELETTRONI E POSITRONI DA 250 MeV.

Estratto dalla: Ric. Scientifica, 32(I), 137 (1962)

L'anello di accumulazione "AdA" per elettroni e positroni da 250 MeV

C. BERNARDINI, U. BIZZARRI, G. CORAZZA, G. DI GIUGNO
G. GHIGO, R. QUERZOLI & B. TOUSCHEK

Istituto di Fisica dell'Università - Roma
Laboratori Nazionali del CNEN - Frascati (Roma)

... ἄλλα ἀπόδοτε καὶ
μὴ ἀμελήσητε.
Plato.

1 - Introduzione.

Scopo della fisica delle particelle elementari è l'esplorazione della loro struttura. Secondo il principio di indeterminazione di Heisenberg il potere risolutivo Δx di una esperienza atta a rivelare questa struttura è legato al momento Δp trasferito dalla particella *sonda* alla particella *bersaglio* dalla disuguaglianza:

$$\Delta p \Delta x \gtrsim \frac{\hbar}{2}$$

Per rivelare dettagli dell'ordine di 10^{-14} cm occorre quindi un impulso trasferito di almeno 10^9 eV/c.

Uno dei problemi fondamentali della teoria delle particelle elementari è quello dei limiti della applicabilità della elettrodinamica: lo studio di questo problema

va fatto preferibilmente esaminando i processi d'urto fra elettroni, positroni e raggi γ , dato che le altre particelle posseggono una struttura che molto probabilmente non è determinata dalla elettrodinamica.

La difficoltà nell'ottenere una buona risoluzione Δx nel caso, per esempio, dell'urto di un elettrone di alta energia ed un elettrone fermo, sta nell'aumento relativistico della massa della particella proiettile.

La situazione si può paragonare all'urto fra un treno ed una palla da tennis. Il treno corrisponde all'elettrone di alta energia, la palla da tennis all'elettrone bersaglio e l'impulso trasferito dal treno alla palla è ovviamente molto piccolo se confrontato coll'impulso del treno. In formule (valide per particelle relativistiche) l'impulso p richiesto per dare un tra-

sferimento d'impulso Δp è dato da

$$p = \frac{\Delta p^2}{2 m c}$$

ove m è la massa di riposo della particella. Per un Δp di 10^9 eV/c occorre quindi un impulso della particella sonda di circa 10^{12} eV/c cioè un'energia circa 30 volte più grande di quella prodotta dalle più grandi macchine esistenti.

Ovviamente la prima idea che balza all'occhio è quella di cercare un modo per far collidere due particelle, ambedue di altissima energia: l'esperienza ci insegna che il momento trasferito nello scontro di due treni è sempre confrontabile con il loro stesso impulso.

2 - Gli anelli di accumulazione.

Lo studio dell'urto elettrone-elettrone in fasci incrociati fu per la prima volta proposto concretamente da O'NEILL nel 1956.

Il metodo probabilmente più conveniente per ottenere un elevato rendimento di reazioni tra due fasci che si incrociano è quello di fare incontrare un grandissimo numero di volte le particelle antagoniste facendole circolare su percorsi chiusi con uno o più punti in comune. In questo modo, ciascun elettrone di un fascio attraversa una quantità di materia (l'altro fascio) abbastanza grande perché la probabilità di una interazione sia di un ordine di grandezza osservabile. Pertanto, è necessario ricorrere ad anelli magnetici; nel caso delle collisioni e^-e^- di O'Neill, per esempio, il progetto prevede due anelli tangenti in cui il punto di tangenza è il luogo dove avvengono le collisioni tra elettroni di momento uguale ed opposto. Nei due anelli il campo magnetico è uguale in modulo e direzione.

Le particelle di ciascun fascio circolante interagiscono, naturalmente, oltre che con l'altro fascio, anche con gli atomi del gas residuo della camera a vuoto dell'a-

nello. Queste interazioni sono indesiderabili per due motivi:

(1) Esse eliminano elettroni dai fasci prima che abbiano dato luogo ad un processo rilevante. Poiché il numero di eventi interessanti è determinato dalle densità di particelle circolanti, è conveniente accrescere questa densità accumulando un gran numero di particelle prodotte dalla sorgente. Ma questo processo di accumulazione va in saturazione quando le perdite dovute al gas residuo compensano il flusso di iniezione dalla sorgente.

(2) Le interazioni con il gas residuo producono una radiazione di fondo che può disturbare l'osservazione dei prodotti di collisione tra i fasci.

Pertanto, è necessario che la densità del gas residuo sia quanto più piccola possibile: una pressione, nella camera a vuoto di 10^{-9} tor è già sufficiente per garantire che un elettrone circoli in media almeno 30 ore prima di essere eliminato. Queste pressioni, se pur basse, non sono oggi problematiche e costituiscono la chiave del funzionamento degli anelli di accumulazione.

Un problema minore è rappresentato dal fatto che un elettrone in moto in un campo magnetico irradia una frazione apprezzabile della sua energia ad ogni giro. Per esempio se l'orbita è un cerchio di raggio $R = 60$ cm, un elettrone di energia $E = 200$ MeV irradia circa 300 eV per giro; questa energia dissipata per giro è proporzionale a E^3/R . Le modalità dell'irraggiamento sono le seguenti: con un processo analogo alla bremsstrahlung viene emesso un gran numero di fotoni molli per giro (generalmente lo spettro si spinge sino ai raggi X molli a partire da frequenze radio). La perdita media di energia per giro è quella detta sopra; tuttavia sono possibili fluttuazioni, del numero di fotoni emessi, che producono perdite sensibilmente diverse dalla media.

Pertanto, è necessario, come in un sincrotrone usuale, disporre di un elemento

acceleratore (una cavità a radio-frequenza sincrona con una frequenza multipla di quella di rotazione delle particelle nell'anello) che ha la funzione di compensare la perdita media di energia e di contenere le eventuali fluttuazioni attorno alla perdita media. Poiché anche una fluttuazione troppo grande eliminerebbe un elettrone dal fascio di cui fa parte, questo processo può contrastare l'accumulazione se la tensione della cavità non è ragionevolmente sovradimensionata: per tutti gli anelli attualmente in corso di realizzazione questo sovradimensionamento non costituisce un problema tecnico difficile.

Il fascio di un anello di accumulazione presenta le seguenti proprietà geometriche:

(1) Se la R. F. opera sulla n -esima armonica della frequenza di circolazione degli elettroni il fascio è diviso in n pacchetti, la lunghezza dei quali dipende dall'ampiezza della R. F.

(2) L'altezza del fascio è essenzialmente determinata dalla pressione del gas residuo.

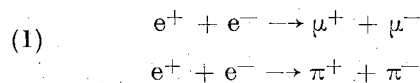
(3) La larghezza radiale è determinata dalle fluttuazioni nelle perdite di radiazione.

Per esempio in un anello con un raggio R di 60 cm, una energia di 200 MeV, una ampiezza di R. F. di ca. 4 kV operante in 2^a armonica con un vuoto di 10^{-9} tor la lunghezza dei pacchetti risulta di ca. 10 cm, l'altezza di 10^{-3} cm, la larghezza di 10^{-1} cm.

3 - L'anello di accumulazione AdA.

Alcuni anni dopo la proposta di O'NEILL, un gruppo di ricercatori dell'Università di Roma e dei Lab. Naz. di Frascati iniziò lo studio della possibilità di produrre collisioni tra elettroni positivi e negativi in moto (fasci incrociati e^+ e e^-). L'ovvio vantaggio di questo tipo di collisioni sta nel fatto che sono permesse reazioni a due

corpi diverse dalla semplice diffusione di e^+ su e^- ; per esempio:



L'energia degli elettroni (o positroni) chiesta per ottenere reazioni del tipo (1) è piuttosto modesta nel caso degli anelli di accumulazione: la soglia della reazione in due μ è di appena 105 MeV per l'elettrone ed altrettanti per il positrone, cioè circa 1/10 dell'energia di un sincrotrone come quello di Frascati. Se la reazione $e^+ + e^- \rightarrow \mu^+ + \mu^-$ dovesse prodursi per urto di un e^+ contro un e^- fermo, occorrerebbero positroni di 40 GeV ca. (soglia

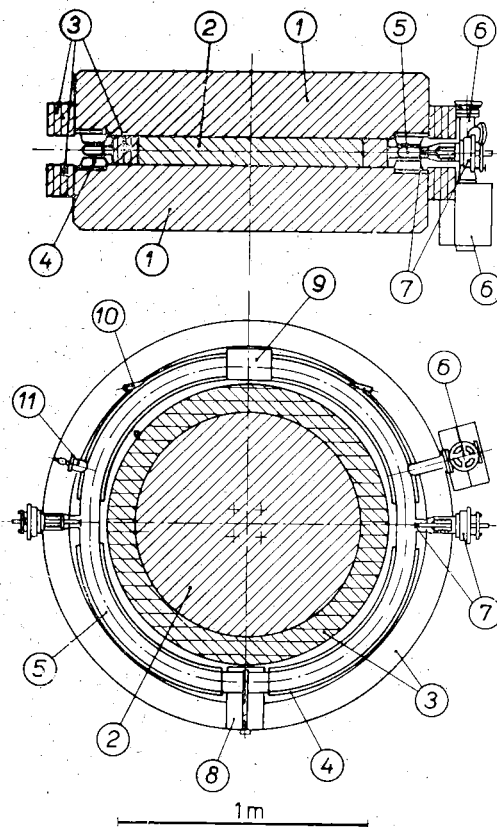


FIG. 1 - Anello di accumulazione « AdA ».
1 - Giogo del magnete; 2 - Nucleo del magnete; 3 - Avvolgimenti; 4 - Poli del magnete; 5 - Camera a vuoto; 6 - Pompa al titanio; 7 - Convertitore; 8 - Cavità a RF; 9 - Sezione per esperienze; 10 - Finestre per la luce emessa dagli elettroni; 11 - Vacuometro.



FIG. 2 - La torre con l'anello sui binari che permettono la traslazione ortogonale alla direzione dei γ provenienti dal sincrotrone.

nel sistema del laboratorio), un'energia troppo alta per le possibilità tecniche degli acceleratori di elettroni attuali.

È stato perciò realizzato in Frascati un anello di piccole dimensioni ($E \lesssim 250$ MeV); si tratta essenzialmente di un magnete del tipo di quelli dei sincrotroni (ma a campo costante) dotato di una camera a vuoto in acciaio inossidabile e di

dal sincrotrone di Frascati (un impulso ogni ventesimo di secondo) vengono inviati su un filo metallico (materiale ad alto Z , generalmente tantalio) posto nella camera a vuoto di AdA, normale al piano di simmetria del magnete ed a qualche centimetro fuori dell'orbita sincrona. I quanti γ producono coppie di elettroni positivi e negativi: a seconda del verso

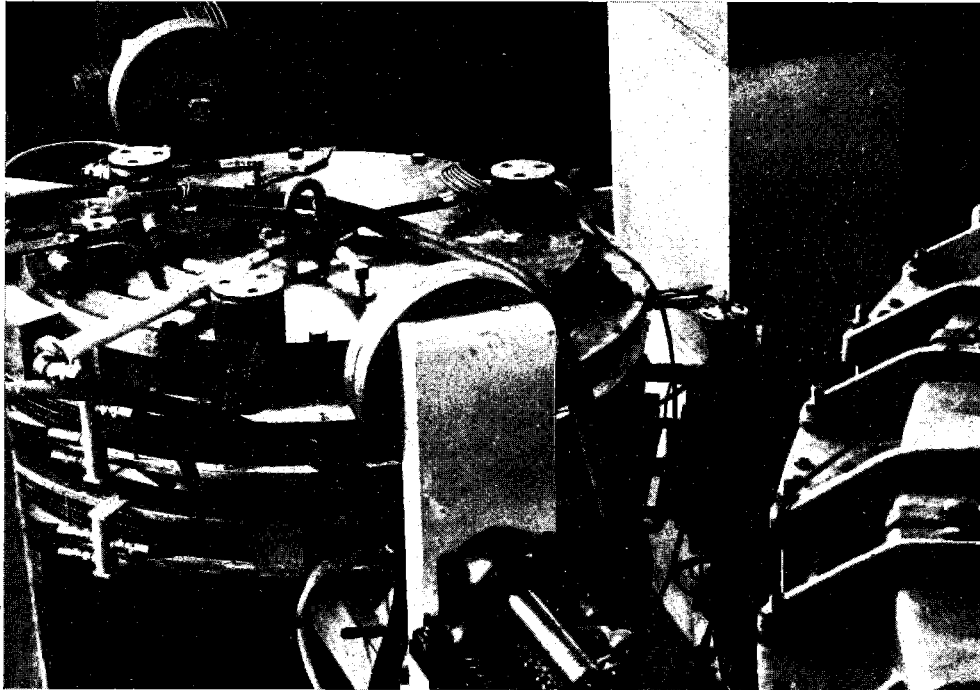


FIG. 3 - Il montaggio rotante del magnete (*girarresto*). È visibile in primo piano l'asse di rotazione; a destra, la pompa al titanio innestata sulla camera a vuoto.

un impianto a radiofrequenza capace di produrre fra i piatti della cavità almeno 5 kV a circa 150 Mc/s (Fig. 1). Le caratteristiche principali di questo anello (AdA = Anello di Accumulazione) sono le seguenti:

- raggio medio delle orbite 60 cm
- indice di campo 0,55
- campo massimo 14000 Gs

Conviene ora descrivere il meccanismo di iniezione adottato: i raggi γ prodotti

del campo, i positroni o gli elettroni che hanno energia, direzione e luogo di produzione corrispondenti ad un'orbita stabile del magnete iniziano un moto su un percorso chiuso contenuto entro la camera a vuoto. Essi ritornerebbero sul convertitore in un tempo più o meno breve, se un fenomeno dissipativo non assorbisse parte dell'energia delle oscillazioni intorno all'orbita sincrona (la cavità infatti compensa solo la componente della forza dissipatrice nella direzione tangente all'orbita sincrona).

Questo fenomeno dissipativo è sostanzialmente l'irraggiamento il quale agisce in un modo abbastanza complesso sulle componenti trasverse delle velocità (smorzamenti per radiazione).

Una volta accumulati, per esempio, positroni, si possono immettere nell'anello elettroni spostando il magnete in modo

gradino positivo corrisponde ad un elettrone accumulato, un gradino negativo ad un elettrone eliminato. Questa figura si riferisce a condizioni di vuoto piuttosto cattive.

Esaurite queste prove preliminari intese a collaudare le prestazioni dei componenti dell'anello e dei metodi di rive-

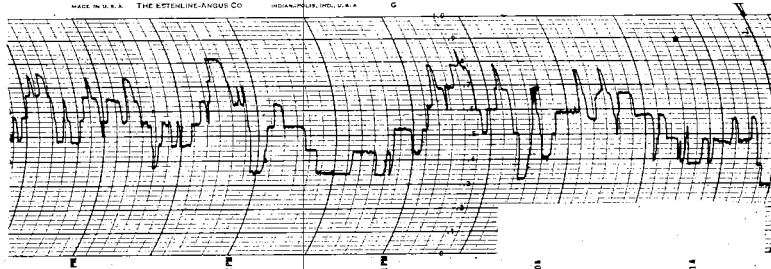


FIG. 4 — Registrazione della luce raccolta da un fototubo che guarda le traiettorie elettroniche. La vita media degli elettroni era di 21 s, l'energia di 210 MeV; la scala dei tempi di 10 s/divisione.

che i γ del sincrotrone incontrino un filo diametralmente opposto al primo; oppure si può rotare il magnete di 180° attorno ad un diametro che passa per il filo in modo da ottenere un ribaltamento del campo senza doverlo spegnere.

Una prima serie di misure è stata effettuata appunto disponendo di una torre che consentiva traslazioni dell'anello (Fig. 2); attualmente il magnete è montato su un supporto rotante (*girarrosto*) che permette il ribaltamento nella seconda maniera (Fig. 3).

Il metodo di osservazione degli elettroni accumulati è il seguente: un fotomoltiplicatore guarda attraverso il quarzo di una appendice tangente della camera a vuoto la luce emessa dagli elettroni in moto (una piccola frazione di essa passa per la finestra). La luce di un singolo elettrone che giri per almeno una frazione di secondo è comodamente visibile ad occhio. La corrente all'anodo del fototubo (per esempio un 6810A) è registrata su un nastro di carta millimetrata sul quale i successivi ingressi o scomparse di elettroni iniettati si presentano come in Fig. 4: un

lazione dei fasci accumulati, il programma di lavoro con AdA è stato indirizzato verso i seguenti obiettivi:

- (1) Realizzazione di una buona velocità di iniezione;
- (2) Realizzazione delle condizioni di vuoto che corrispondono a vite medie degli elettroni accumulati superiori all'ora;
- (3) Determinazione delle dimensioni dei fasci circolanti;
- (4) Osservazione di reazioni provenienti dall'incrocio di fasci di e^+ ed e^- .

Per quanto riguarda il primo punto, si è trovato che è possibile migliorare la velocità di iniezione modificando la ampiezza di tensione a radiofrequenza della cavità durante l'impulso di raggi γ dal sincrotrone. Il meccanismo si può descrivere così: solo pochi elettroni iniettati hanno frequenza di rotazione nell'anello abbastanza vicina a quella della cavità perché questa possa agire in risonanza su di essi rifornendo l'energia dissipata per irraggiamento. L'intervallo utile di frequenze è definito dalla tensione della cavità. Gli elettroni non sincroni si al-

lontanano, è vero, dal convertitore abbastanza rapidamente per avere una buona probabilità di evitarlo; ma essi continuano ad allontanarsene indefinitamente e vengono quindi perduti se non si interviene al momento opportuno allargando la banda di frequenze di rotazione ac-

una vita media di 40 ± 10 ore. Queste vite medie sono in buon accordo con i valori calcolati a partire dalla pressione misurata: nell'ipotesi che il gas residuo sia aria, 40 ore corrispondono a circa 5×10^{-10} tor.

In queste condizioni di lavoro, ci si

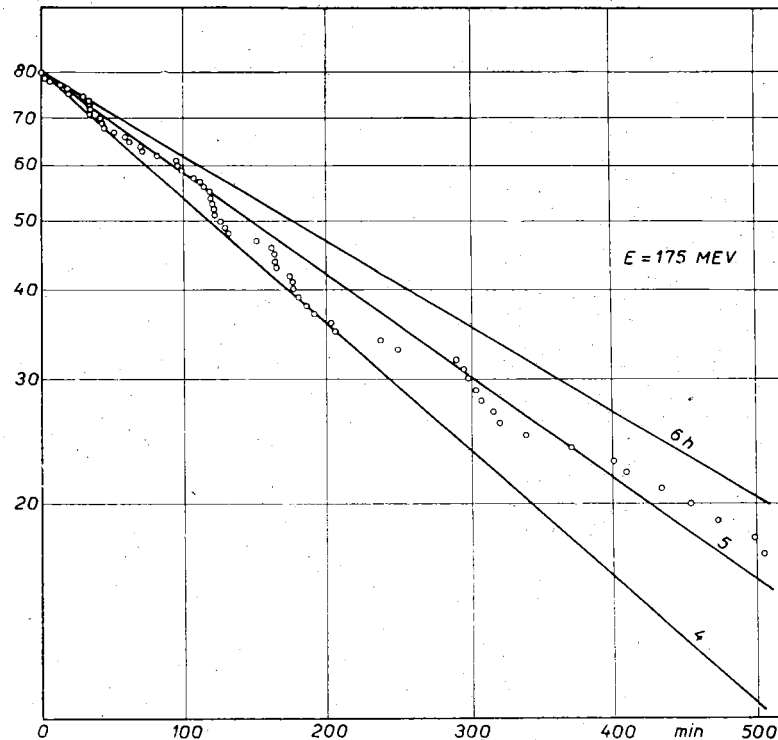


FIG. 5 - Curva di decadimento di 82 elettroni accumulati: in ordinate è il numero di elettroni presenti al tempo t , misurato in ascisse in minuti.

cettate. Con questo metodo si sono ottenuti risultati che mostrano la possibilità di accumulare $3,6 \times 10^5$ elettroni in un'ora.

Le condizioni di vuoto che permettono tempi di accumulazione così lunghi sono state realizzate in una camera a vuoto d'acciaio inossidabile associata ad una pompa al Ti e degassata a circa 350 °C per alcuni giorni. La Fig. 5 mostra la curva di decadimento di 80 elettroni accumulati in questa camera a vuoto; la vita media era qui di circa 5 ore ma, successivamente, è stata realizzata una migliore condizione di vuoto corrispondente ad

aspettava che le dimensioni trasversali dei fasci fossero di circa 1 mm nella direzione radiale e di qualche decina di μ nella direzione normale al piano di simmetria dell'anello: la Fig. 6 mostra una fotografia di un fascio realizzata mediante la luce emessa dagli elettroni. Le dimensioni apparenti sono di 1 mm radiale e 0,6 mm verticale: le dimensioni verticali fotografate sono interamente dovute al fatto che l'apertura angolare naturale della luce emessa è così piccola ($\approx mc^2/E$) da non permettere per principio la determinazione con luce visibile delle dimensioni vere.

L'importanza dell'area della sezione dei fasci di e^+ ed e^- è dovuta al fatto che il numero di reazioni, con una sezione di urto σ , che si producono nell'unità di tempo nelle zone di incrocio è dato da:

$$\dot{n} = \frac{1}{2} \nu \frac{N_+ N_-}{S} \sigma$$

dove ν è la frequenza di rotazione delle particelle nello anello, N_{\pm} è il numero di

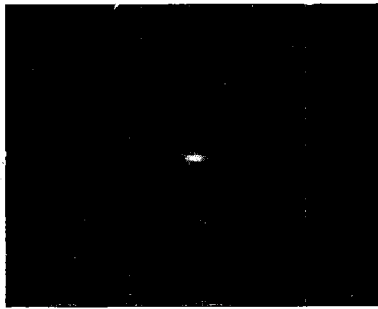
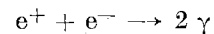


FIG. 6 - Fotografia della sezione di un fascio (ingrandita). Le dimensioni lineari più grandi (radiali) corrispondono ad una larghezza quadratica media di circa 1,4 mm.

e^{\pm} accumulati ad S è l'area della sezione dei fasci. Come si vede, \dot{n} dipende in modo essenziale da S . Poiché, per AdA, $\nu \simeq 10^8$ s $^{-1}$, se $S = 10^{-4}$ cm 2 , e $N_+ = N_- = 6 \times 10^7$ sarà possibile osservare una reazione con $\sigma = 10^{-30}$ cm 2 alla velocità di 1 evento ogni dieci minuti.

Questo è effettivamente l'ordine di grandezza delle sezioni d'urto di alcune reazioni come



nell'intervallo di energie considerato.

Pertanto, il quarto punto del programma sarà reso effettuabile nel prossimo futuro se ritroverà in modo di raggiungere intensità di fasci accumulati convenientemente grandi: l'osservazione di questi annichilamenti sarebbe già possibile se, in luogo del sincrotrone, si disponesse di una sorgente di e^- ed e^+ più intensa ed adatta all'anello come un acceleratore lineare.

Alla realizzazione di AdA hanno contribuito numerose persone che gli autori desiderano ringraziare: l'ingegner J. Smith ed il dr. E. Wattecamp per il contributo durante la loro permanenza in Frascati; l'ing. G. C. Sacerdoti che ha curato la costruzione del magnete; l'ing. M. Puglisi ed il dr. A. Massarotti che hanno realizzato l'impianto a radiofrequenza. In particolare, gli A. desiderano ringraziare il personale dei Laboratori di Frascati per il costante e tempestivo aiuto tecnico in tutte le fasi della attività.