

Laboratori Nazionali di Frascati

LNF-62/133 (1962)

G. Cortellessa, U. Amaldi jr., A. Reale: L'ELETTROSINCROTRONE:
OTTICA DI INIEZIONE.

Estratto dal: Nuovo Cimento, Suppl. 24, 298 (1962)

CAPITOLO II

Ottica di iniezione.

G. CORTELESSA, U. AMALDI jr. e A. REALE (*)

1. - Introduzione.

L'iniezione degli elettroni, nei sincrotroni ad alta energia, avviene secondo il ben noto schema: preaccelerazione degli elettroni in una macchina acceleratrice a bassa energia, l'iniettore e successiva immissione sull'orbita di iniezione a mezzo di opportuni dispositivi di deflessione. È necessario avere, secondo questo schema, un sistema ottico elettronico che raccolga il fascio in uscita all'iniettore, lo focalizzi convenientemente e lo defletta nella direzione richiesta entro la ciambella.

Si vuole descrivere, in ciò che segue, le richieste poste a questo sistema ottico elettronico, le soluzioni scelte e le prestazioni fornite (Fig. VI.II.1).

Vogliamo anche notare che, accanto ai sistemi di lenti, al deflettore elettrostatico, ai sistemi di deflessione magnetica, descriveremo anche alcuni accorgimenti costruttivi, nonché quelle parti ausiliarie che permettono l'osservazione del fascio e la misura della corrente di picco e della forma dell'impulso iniettato.

La suddivisione dei compiti tra i vari ricercatori del gruppo della Sanità è stata la seguente. U. AMALDI si è occupato prevalentemente dell'ottica elettronica e della realizzazione delle lenti magnetiche e relativi alimentatori; G. CORTELESSA ha curato in modo particolare la connessione tra i vari organi e l'assiemaggio e si è occupato delle prove di funzionamento; A. REALE ha realizzato l'alimentatore del deflettore. Il progetto del deflettore elettrostatico è stato curato da M. AGENO.

(*) Istituto Superiore di Sanità, Laboratori di Fisica.

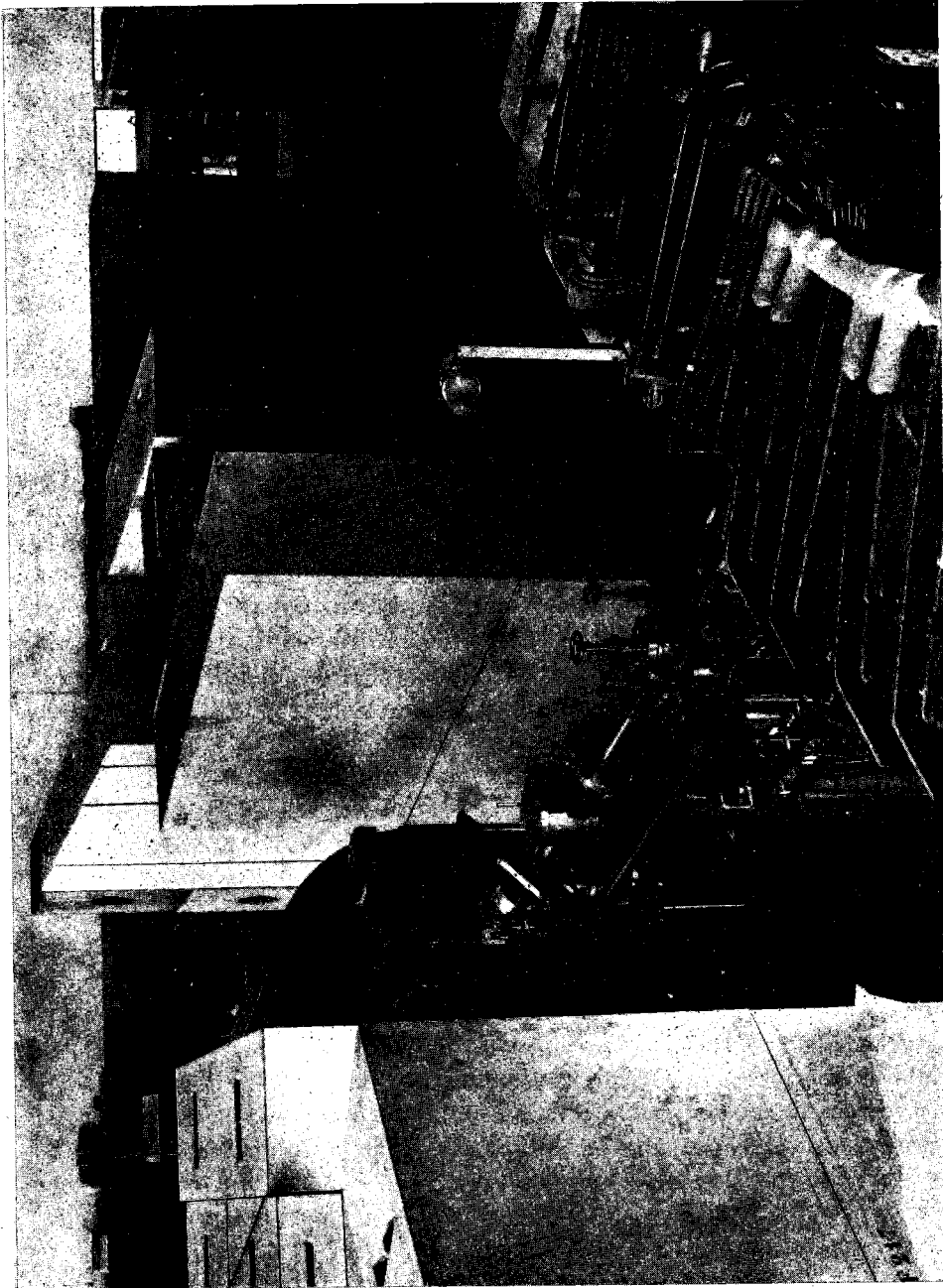


Fig. VI.11.1. - Veduta d'assieme del sistema ottico elettronico.

2. - Il problema.

Il fascio di elettroni emesso da un iniettore è divergente. Le cause di questa divergenza sono molte. Se ci limitiamo a discutere la situazione degli iniettori ad accelerazione statica (Cockcroft-Walton, Van de Graaff), possiamo citare tre cause che rendono il fascio divergente.

La prima causa è legata al fatto che gli elettroni vengono emessi dalla sorgente entro un certo angolo. Questo angolo si riduce per effetto dell'accelerazione nel campo elettrico del tubo acceleratore ma non va completamente a zero.

La seconda ragione per la divergenza del fascio è la carica spaziale. L'effetto di carica spaziale è sensibile solamente durante le prime fasi dell'accelerazione, non appena gli elettroni divengono relativistici l'effetto di carica spaziale è fortemente diminuito. È possibile compensare l'effetto di carica spaziale sagomando opportunamente i primi elettrodi del tubo acceleratore.

Una terza causa è che il diottro d'uscita del tubo acceleratore è divergente. Esso infatti è costituito da una transizione da una zona con campo elettrico diverso da zero, il tubo acceleratore, a una zona esterna in cui il campo elettrico è nullo.

Si può calcolare [1] che la divergenza complessiva dovuta a queste cause, definita come la semiapertura del cono entro cui è contenuto il 99 % della corrente complessiva, non supera i 10^{-3} rad, nel caso particolare di un tubo acceleratore lungo 2.8 m. Questo vale supponendo che la sagomatura dei primi elettrodi del tubo acceleratore compensi l'effetto di carica spaziale.

Definita così la caratteristica più importante, ai fini della nostra discussione, del fascio emesso dall'iniettore e cioè la divergenza, chiediamoci quali sono le richieste che si pongono per le caratteristiche del fascio al termine di tutto il sistema ottico elettronico.

Il fascio iniettato nell'elettrosincrotrone (e.s.) deve avere una dimensione verticale inferiore al centimetro, una dimensione orizzontale inferiore ai 5 mm e un angolo di divergenza minore di $3 \cdot 10^{-3}$ rad.

Oltre a questo si può dire che occorrerà avere un'ampia possibilità di spostare il fascio in modo da iniettarlo tangenzialmente oppure con un certo angolo su una qualsiasi orbita che si voglia precegliere entro l'apertura del sincrotrone. Questo perchè si vuole conservare la possibilità di usare il fascio di elettroni per esplorare il campo magnetico in tutta la zona utile del traferro.

3. - Il sistema ottico elettronico.

Le caratteristiche del fascio emesso dall'iniettore e le richieste per il fascio da iniettare nell'e.s. non sono dati sufficienti a definire univocamente il sistema ottico elettronico. Prima di passare a descrivere, dettagliatamente, la soluzione

adottata, occorre precisare le ragioni per cui si è scelta quella certa soluzione.

Un dato aggiuntivo rispetto ai precedenti è l'ingombro relativo dell'iniettore e del magnete dell'e.s. Se si vuole mantenere una buona accessibilità dell'iniettore, occorre collocarlo in modo che la bocca di uscita degli elettroni sia a più di due metri dal magnete. È anche assai conveniente porre l'iniettore ad un angolo abbastanza grande rispetto alla tangente all'orbita così da allontanare la tank dell'iniettore dal magnete.

In base a considerazioni di ingombro si è perciò scelto un angolo, tra la direzione dell'iniettore e la tangente all'orbita, di 60° .

Si sono, susseguentemente, scartati anche per il caso dell'e.s. di Frascati, sistemi di deflessione magnetica in prossimità del campo magnetico dell'e.s. Sistemi non impossibili ma che danno certamente luogo a inconvenienti per l'interferenza con il campo magnetico principale della macchina.

Rimane così, per il deflettore, la soluzione elettrostatica.

Un deflettore elettrostatico a 60° può essere semplicemente cilindrico e cioè costituito da due piastre parallele piegate ad arco di cerchio che presentano perciò, in verticale, una sezione rettangolare, oppure può avere forma più complicata.

Un deflettore cilindrico ha le proprietà di una lente cilindrica: è focalizzante nel piano perpendicolare all'asse del cilindro cioè lungo un asse perpendicolare alle due piastre e non ha proprietà focalizzanti lungo un asse parallelo punto per punto alle piastre stesse. Questo avviene, ovviamente, perchè il campo elettrico è puramente radiale. Per ottenere proprietà focalizzanti occorre che il campo elettrico abbia componenti diverse da zero in direzione perpendicolare al raggio. È possibile ottenere questo sagomando le piastre in modo che, ad esempio, esse siano sezioni di sfere concentriche. Non vi sono, però, fondate ragioni in favore di una soluzione più complessa del semplice deflettore cilindrico. È anzi possibile dire che soluzioni diverse, con sagomatura delle piastre, complicherebbero notevolmente la lavorazione.

La convenienza del deflettore cilindrico può forse essere affermata pensando che è sufficiente premettere al deflettore una seconda lente cilindrica ruotata di 90° per ottenere un sistema telescopico. La costruzione di una lente magnetica cilindrica è semplice, si tratta infatti di un quadrupolo. È preferibile quindi adottare per il deflettore la soluzione che semplifica i già pesanti problemi costruttivi.

Gli altri parametri del deflettore restano fissati quando si consideri che il campo elettrico tra le piastre non può sorpassare il limite di $5 \cdot 10^6$ V/m, senza che si vada incontro a difficoltà di funzionamento su lunghi periodi. A un tale valore del campo elettrico infatti, cominciano a intervenire effetti di estrazione a freddo ed altre cause di scarica ancora poco note [2], specialmente quando la separazione tra gli elettrodi è dell'ordine del centimetro o più.

Prefissato perciò un campo massimo di $5 \cdot 10^6$ V/m, da raggiungersi sola-



mente come limite nel caso che si voglia aumentare l'energia di iniezione di quasi un fattore due, se ne ricava un raggio di curvatura di 0.8 m.

La scelta dei parametri è perciò finita. Dai dati così raccolti si ricava, dalla formula che dà la distanza focale di un deflettore cilindrico [1], una distanza focale di 43 cm dalla bocca d'ingresso del deflettore.

Si può notare che il deflettore è stato costruito in modo che si potesse agevolmente variare la distanza tra le piastre tra 1 e 1.5 cm. Questo ha permesso di scegliere la distanza più conveniente quando si è deciso di variare l'energia di iniezione portandola a 2.5 MeV. In questo caso, con una distanza tra le piastre di un centimetro, il deflettore lavora con una differenza di potenziale applicata di 35 kV circa e perciò con un campo elettrico inferiore al valore di $5 \cdot 10^6$ V/m che abbiamo discusso come limite pratico.

Il deflettore elettrostatico è preceduto da un sistema di lenti magnetiche cui è affidato il compito di focalizzare gli elettroni in orizzontale in un punto a 0.43 m dalla bocca del deflettore e di fornire un fascio parallelo nel piano verticale. Tutto questo a partire da un fascio divergente, fornito dall'iniettore in un punto a poco più di due metri dalla bocca del deflettore.

Questa distanza tra iniettore e deflettore non poteva essere facilmente ridotta; prima di tutto una distanza più breve imporrebbe richieste stringenti sul potere convergente delle lenti magnetiche e perciò porterebbe a valori elevati la potenza di alimentazione e il peso delle lenti stesse. In secondo luogo è necessario disporre di spazio per poter inserire finestre di osservazione, elettrodi raccoglitori e un elettrodo a induzione nel pezzo di transizione tra iniettore e deflettore, così da osservare le caratteristiche elettriche dell'impulso di elettroni, anche durante il funzionamento dell'e.s., senza interrompere il fascio.

Queste esigenze combinate hanno condotto a scegliere un sistema di due lenti: il quadrupolo cui si è già accennato che, combinato col deflettore, dà un sistema telescopico, e una lente a mantello, a simmetria assiale, che focalizza il fascio divergente proveniente dall'iniettore.

È possibile trattare [1] molto semplicemente questo sistema come due lenti sottili non a contatto; naturalmente, per risolvere il problema è necessario prefissare alcuni parametri in un modo qualunque. Si è scelto di porre la lente a mantello il più vicino possibile alla bocca dell'iniettore, compatibilmente col fatto che si potessero porre, prima del sistema ottico, una coppia di bobine di deflessione necessarie per muovere il fascio. Il compromesso è stato trovato ponendo la lente a mantello a 0.6 m dalla bocca dell'iniettore. Si è posto poi il quadrupolo col centro a 0.3 m dal centro della lente a mantello.

Se si risolve il problema si ricava, per energia cinetica degli elettroni di 2 MeV, una distanza focale di 1.9 m per la lente a mantello e 2.15 m per il quadrupolo.

Se si combinano le proprietà del sistema di lenti magnetiche con quelle del deflettore si giunge a prevedere di avere, all'uscita del deflettore, un fascio

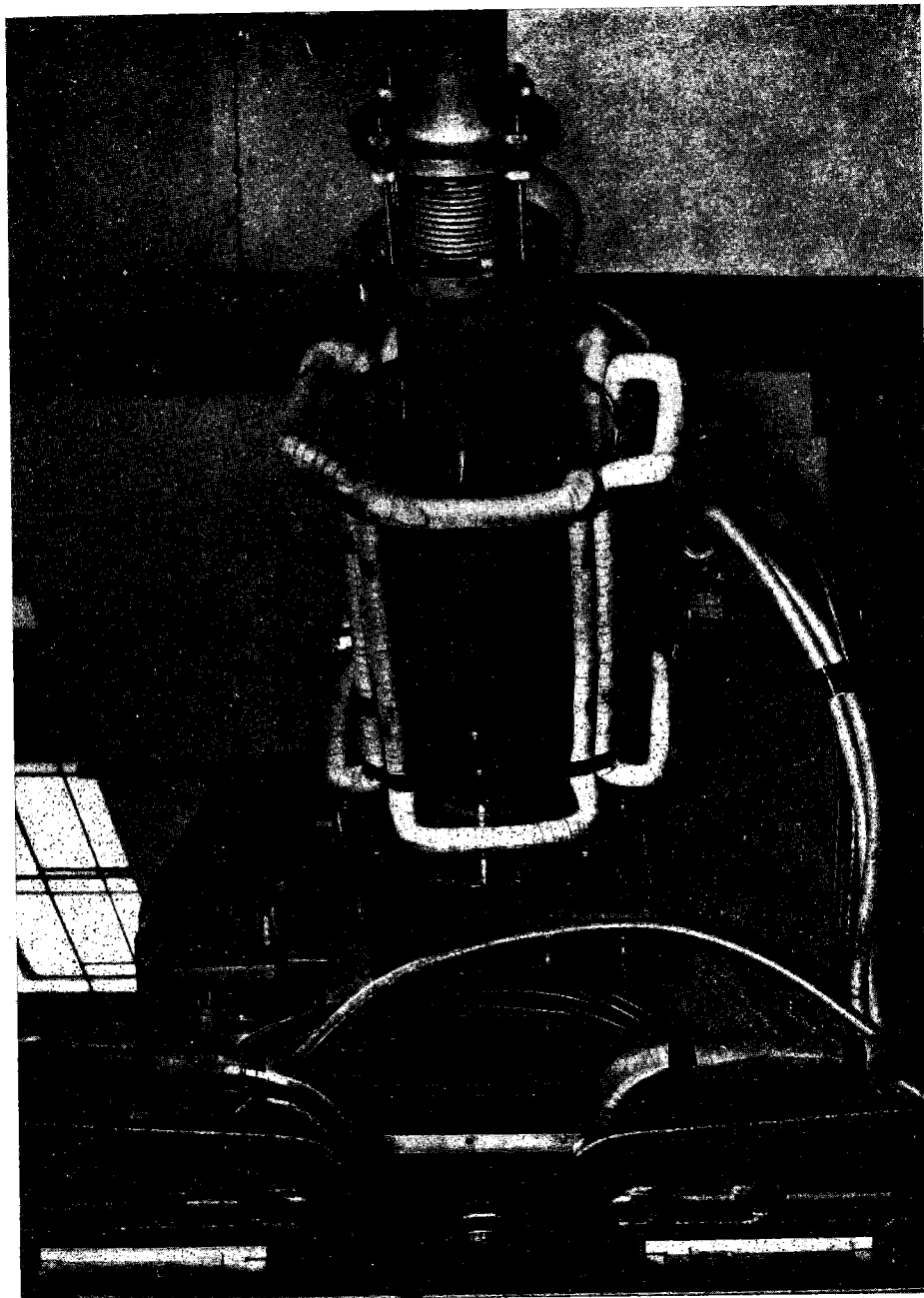


Fig. VI.11.2. - Bobine deflettrici del fascio in prossimità all'ingresso del deflettore.

alto 7 mm e largo circa 5 mm, con una divergenza orizzontale e verticale inferiore al mrad.

I parametri necessari per costruire il sistema di lenti sono perciò prefissati. In realtà si è voluto considerare anche il caso in cui si faccia uso della sola lente a mantello; in questa ipotesi è possibile focalizzare il fascio nel fuoco del deflettore. Si avrà allora in uscita dal deflettore un fascio parallelo in orizzontale e divergente in verticale, si è però pensato che, data la forte focalizzazione in verticale del campo magnetico dell'e.s., potesse essere conveniente tentare, in sede di ricerca del fascio, di abolire del tutto il quadrupolo. Si è così imposta la condizione che la lente a mantello potesse focalizzare, in assenza del quadrupolo, il fascio sul fuoco del deflettore. Questo, nella geometria scelta, conduce a richiedere che la lente a mantello abbia una distanza focale minima di un metro, per elettroni da 2 MeV di energia.

Accanto alle due lenti magnetiche è stato necessario prevedere due coppie di bobine deflettrici (Fig. VI.11.2) poste alla bocca dell'iniettore e due altre coppie poste alla bocca d'ingresso del deflettore. Il complesso delle bobine deflettrici permette di collocare il fascio in un punto prefissato della bocca del deflettore, con una angolazione voluta. È necessaria una coppia di bobine per deflettere nelle due direzioni: orizzontale e verticale.

4. - I problemi costruttivi.

Il progetto e la costruzione delle lenti magnetiche non comporta particolari difficoltà. Si sono adottate per la lente a mantello e il quadrupolo le formule esistenti nella letteratura [3, 4, 5]. Gli avvolgimenti sono stati eseguiti in modo che occorresse una corrente massima di 200 mA per la lente a mantello a 50 mA per il quadrupolo. Tutta la progettazione è stata condotta entro larghi limiti di sicurezza, cosa rivelatasi utile quando si è variata l'energia di iniezione da 2 a 2.5 MeV e non si è dovuto introdurre alcun cambiamento nel sistema ottico elettronico. Molto diverso, invece, il caso del deflettore che ha comportato un notevole lavoro di progetto e la necessità di una esecuzione accurata.

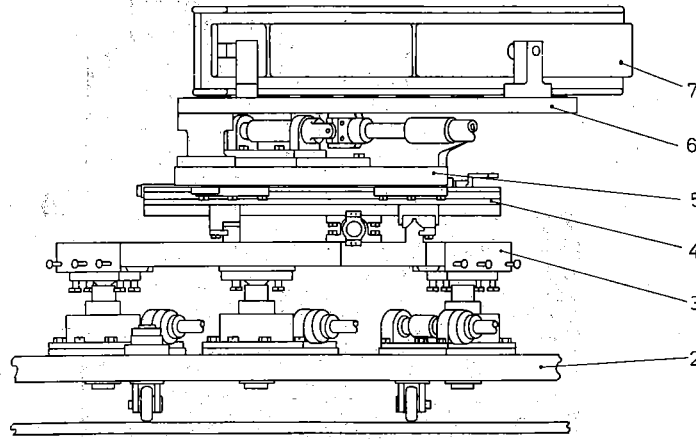
Le parti in cui si può pensare diviso il deflettore sono: le piastre deflettrici propriamente dette, col loro sostegno isolante, e il sistema di slitte e di piani incernierati che fa da supporto alle piastre e permette di collocarle nella posizione voluta (Fig. VI.11.3 e VI.11.4).

Le piastre deflettrici sono quattro: una, a terra, lunga 80 cm, le altre tre a tensione, lunghe ciascuna 25 cm circa. Come si vede dalla Fig. VI.11.4, le tre piastre a tensione possono ricevere, con opportuni contatti a molla, tre tensioni differenti. Le molle di contatto sono infatti collegate a tre spinotti nell'isolatore di araldite visibile in figura sulla sinistra.

La possibilità di dare tre tensioni differenti, non sfruttata poi nel funziona-

mento del sincrotrone, era stata prevista per avere un addizionale grado di libertà negli spostamenti nel piano orizzontale.

Le piastre sono sostenute da colonnine di araldite, avvitate sul piano di sostegno.



Vista A - A'

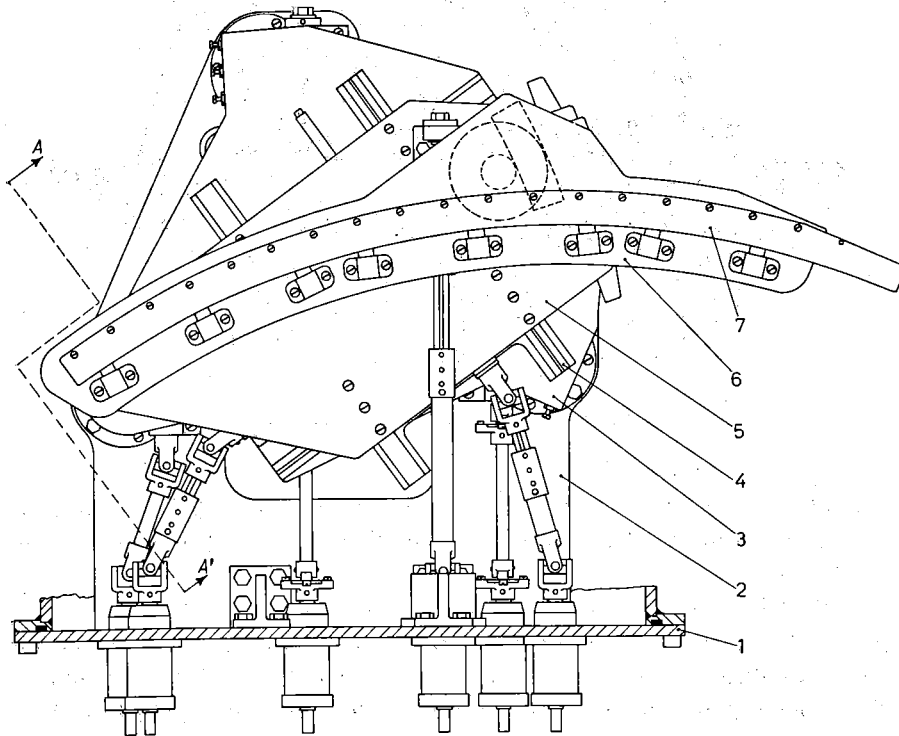


Fig. VI.II.3. - Deflettore. Veduta d'assieme.

Come si vede dalla Fig. VI.11.3. il sistema di slitte è a tre piani. A partire dall'alto incontriamo il primo movimento del deflettore, quello in angolo. Se si ha presente il fatto che la bocca di uscita è quella, in figura, rivolta verso

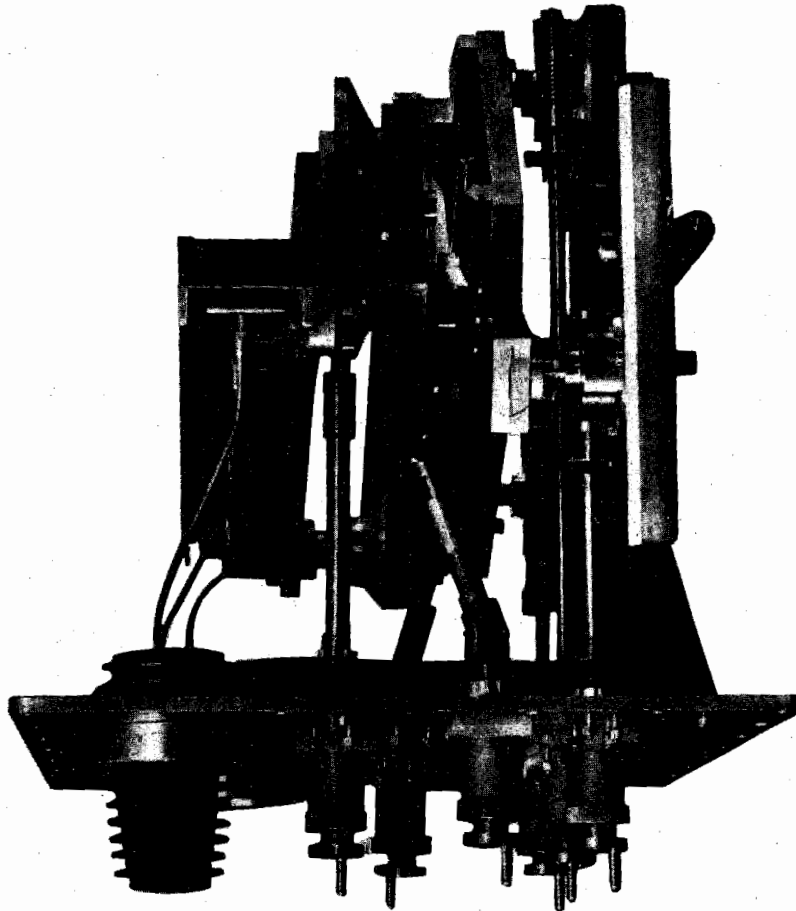


Fig. VI.11.4. - Deflettore. Veduta d'insieme.

L'osservatore, si comprende che il movimento in angolo mantiene fissa la bocca d'entrata e permette di variare l'angolo della tangente all'orbita all'uscita del deflettore.

Al disotto di questo movimento sono chiaramente visibili due slitte ad angolo retto che permettono di muovere le piastre entro un ampio rettangolo. Si può così disporre la bocca d'ingresso del deflettore nel punto voluto. Più in basso un sistema di tre viti calanti ha lo scopo di aggiustare l'altezza delle piastre.

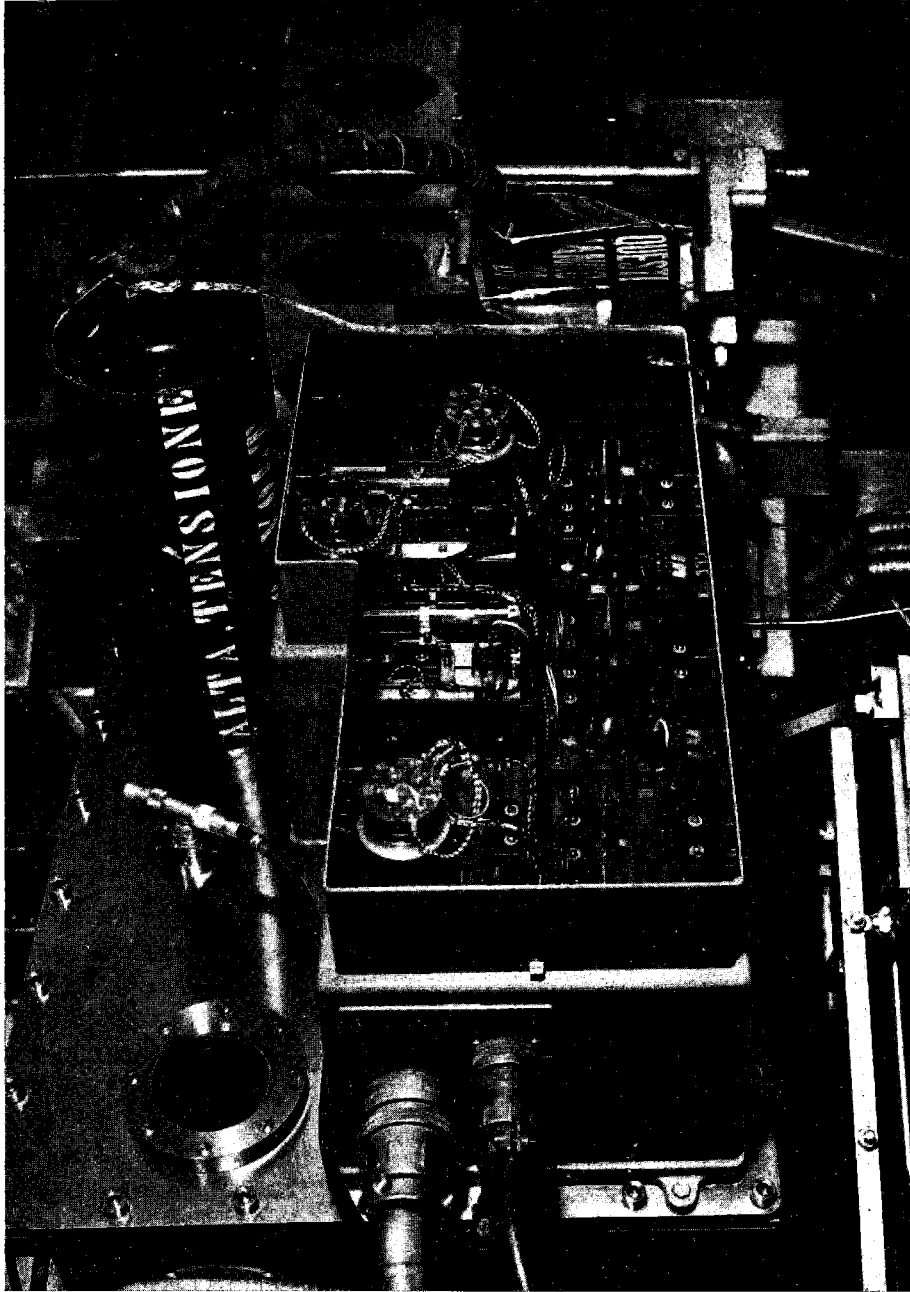


Fig. VI.11.5. - Scatola del deflettore: motori per il movimento, ripetitori di posizione, microswitch di arresto.

L'insieme di questi movimenti permette perciò di raggiungere una configurazione predeterminata sia in altezza che in angolo e in posizione delle piastre deflettrici. Tutti e sei i movimenti sono comandati mediante motori (Fig. VI.11.5). Un sistema di microswitch permette di predeterminare una posizione di lavoro e di ritornare a tale posizione con telecomando.

Una particolare cura è stata posta nella scelta dei materiali di cui sono costituite le varie parti del deflettore. Si è in particolare curato che tutti i movimenti potessero avvenire senza lubrificazione, necessità assoluta perchè il deflettore deve funzionare sotto vuoto e i grassi ed olii lubrificanti non hanno tensione di vapore particolarmente bassa. Si è inoltre curato che i movimenti avvenissero con un minimo gioco. La posizione del deflettore può perciò essere riprodotta entro una frazione di millimetro. In particolare il movimento di angolo e di posizione delle piastre può essere riprodotto con una precisione attorno al decimo di millimetro.

Alcuni accorgimenti costruttivi sono visibili dalla figura, si possono notare ad esempio i blocchi riportati entro le slitte, i giunti elastici per il comando delle viti calanti.

Le piastre, naturalmente, sono state oggetto di lavorazione particolarmente accurata; dopo la fresatura sono state pulimentate a lucido. È noto infatti che le caratteristiche di tenuta alla tensione sotto vuoto dipendono moltissimo dalla presenza di piccole asperità sulle superfici, asperità su cui il campo elettrico può raggiungere valori elevati e dare emissione a freddo [2].

5. - I dispositivi per l'osservazione del fascio.

Due tipi di dispositivo sono stati previsti per l'osservazione del fascio: dispositivi che intercettano il fascio e dispositivi che permettono l'osservazione delle caratteristiche del fascio anche in condizioni di funzionamento normale. Appartengono al primo tipo i dispositivi di osservazione visiva e cioè le bandierine ricoperte di sostanza fluorescente nonché gli elettrodi raccoglitori. Si sono previste, in sede di progetto, due bandierine fluorescenti tra iniettore e ingresso del deflettore, un elettrodo raccoglitore all'ingresso del deflettore. Le bandierine possono essere inserite in posizione tale da essere osservate, attraverso un sistema di specchi piani, anche se vi è forte radiazione. La bandierina in prossimità del deflettore è anche elettrodo raccoglitore; si può così controllare la corrente nel fascio focalizzato dal sistema di lenti magnetiche.

L'elettrodo ad induzione è costituito da un tubo di ottone, lungo 12 cm circa, coassiale col fascio, del diametro interno di 8 cm, isolato. All'inizio e alla fine del tubo si trovano due diaframmi collegati a terra, che lasciano una luce di 6 cm per il fascio. Questi diaframmi proteggono l'elettrodo isolato da

quegli elettroni dispersi che potrebbero provenire dal fascio stesso oppure essere diffusi dalle pareti del condotto iniettore-deflettore.

L'ettrodo ad induzione fornisce un impulso di ampiezza proporzionale all'ampiezza dell'impulso di corrente iniettato e di forma assai simile alla forma dell'impulso iniettato. È possibile perciò avere un controllo continuo dell'impulso d'iniezione.

6. - I circuiti di alimentazione.

Le lenti magnetiche e il deflettore hanno richiesto la realizzazione di circuiti di stabilizzazione dell'alimentazione, di tipo particolare.

Il circuito di stabilizzazione della corrente nelle lenti magnetiche deve provvedere a mantenere costante la corrente sia per variazioni della rete che per variazioni del carico. Variazioni del carico sono prevedibili perchè è inevitabile il riscaldamento dell'avvolgimento e, poichè il coefficiente di temperatura della resistività del rame è del quattro per mille per grado, è prevedibile una variazione della resistenza fino al 20%, per l'innalzamento di temperatura di 50 °C.

La soluzione adottata [1] consiste nel porre il carico sulla placca di un pentodo di potenza che ha la griglia polarizzata a +150 V e una grossa resistenza sul catodo. Questo schema noto è stato modificato polarizzando la griglia schermo del pentodo con una valvola al neon, rispetto al catodo, in modo da evitare la reazione di griglia schermo che si ha invece quando si montino i pentodi a triodo.

Si riesce, in questo modo, ad avere una variazione inferiore al 0.8% della corrente nel carico per variazioni del 20% del carico.

La distanza focale delle lenti, inversamente proporzionale al quadrato della corrente, varia perciò tutt'al più dell'1.6% nelle condizioni estreme. Questa variazione è del tutto tollerabile ed inoltre, poichè la variazione del carico si instaura con una costante di tempo lentissima, termica, è possibile, per l'operatore, riaggiustare dopo un primo periodo di deriva, il valore della corrente al livello voluto.

Gli stabilizzatori di corrente forniscono una corrente massima di 200 mA per la lente a mantello e di 50 mA per il quadrupolo.

Il problema di alimentare il deflettore è ovviamente più complesso. Il deflettore richiede una tensione molto stabile e riproducibile entro l'uno per mille su lunghi periodi di tempo. Poichè, anzi, è difficile ottenere una stabilità molto spinta per la tensione dell'iniettore, si è voluto spingere la precisione della tensione del deflettore al massimo in modo da poter assumere proprio questa tensione come dato di partenza per la misura delle energie degli elettroni iniettati. Questo programma richiede la costruzione di un alimentatore

a 50 kV, in grado di erogare 1 mA, con stabilità estrema e, comunque, migliore dell'uno per mille su un intervallo di 24 ore.

L'analisi dei circuiti già noti ha portato alla conclusione che conveniva cercare di battere una strada nuova [6]. Per ottenere una stabilità di tensione così spinta è infatti necessario avere, per riferimento, una pila campione termostata. Si è però allora di fronte al fatto che la tensione di una pila campione è dell'ordine del volt e perciò il confronto tra la tensione da stabilizzare e il riferimento può avvenire solamente con un partitore che prelevi 1/50 000 della tensione di uscita, nel caso estremo di tensione di uscita di 50 kV. Ciò comporta la necessità di notevole amplificazione nel circuito di controreazione e tende a rendere la stabilizzazione instabile. La difficoltà è stata superata costruendo un circuito a corrente costante, la cui stabilità è confrontata con la pila campione, in modo tale che la variazione dell'alta tensione, prelevata da un partitore formato da una resistenza ordinaria e dal circuito a corrente costante, con resistenza interna praticamente infinita, è interamente riportata al circuito di confronto. Questo accorgimento, nuovo almeno nel caso di alimentatori ad alta tensione, ha permesso di superare le richieste poste sia per la stabilità a lungo termine che per la precisione di determinazione della tensione.

La stabilità a lungo termine, tranne un primo periodo di assestamento nella prima ora di accensione, è dell'uno su diecimila, come ha mostrato un controllo con voltmetro a pila campione (Fig. VI.11.6).

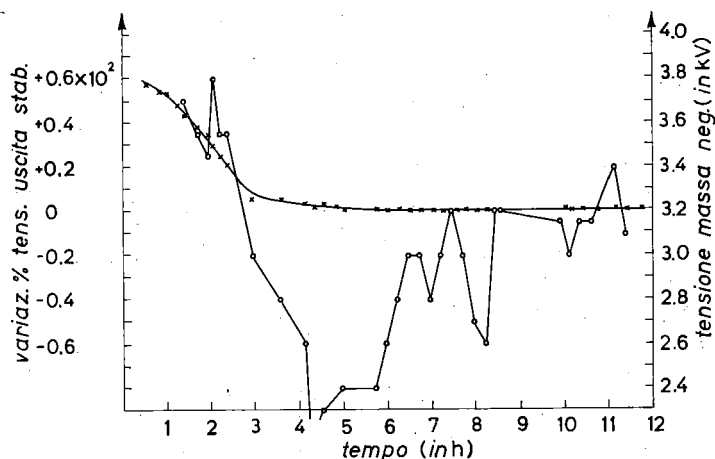


Fig. VI.11.6. - Stabilità nel tempo della tensione d'uscita dell'alimentatore.

Lo strumento è stato costruito interamente, come prototipo, presso il nostro Istituto ed è stato poi realizzato con costruzione industriale della ditta Staer di Roma.

La corrente erogabile, 1 mA, permette di mantenere una stabilità ottima della tensione del deflettore anche in presenza di elettroni diffusi o dispersi da un fascio non ben focalizzato. Si può infatti vedere che la corrente media del fascio di elettroni, con 200 mA di picco iniettati per 10 μ s, 20 volte al secondo, è di 40 μ A, molto inferiore, quindi, alle possibilità di erogazione dell'alimentatore.

7. - Conclusioni.

È possibile oggi, dopo 10 000 ore di fascio erogato per esperienze dall'e.s., tirare le somme sul funzionamento dei dispositivi descritti e sulla effettiva rispondenza tra i dati di progetto e quelle che si sono rivelate le esigenze di funzionamento.

Il sistema ottico elettronico, progettato per una energia di iniezione di 2 MeV, ha risposto in pieno alle richieste anche quando si è deciso di elevare l'energia di iniezione a 2.5 MeV. Prove eseguite fino a 3 MeV hanno dimostrato che sarebbe possibile usare tutti i dispositivi anche a quella energia. Questo conforta la tesi di indirizzare la progettazione con una notevole tolleranza sui parametri.

In particolare il deflettore e la sua alimentazione, che costituiscono il punto più delicato di tutta l'ottica, hanno risposto completamente all'attesa sia nella fase di ricerca del fascio che durante il normale funzionamento. Si può anche dire che i dati di progetto e quelli rilevati in funzionamento effettivo concordano, nel caso di tutto il sistema ottico elettronico.

Al termine di queste conclusioni è certamente doveroso ricordare come alla progettazione e costruzione di tutte le varie parti descritte abbiano dato un contributo notevole il Sig. CORINDO FELICI, capo del servizio elettronico dei Laboratori di Fisica, e, per la parte meccanica del deflettore, i Sigg. ERMENEGILDO SAVI e ALESSIO CAMUSO.

BIBLIOGRAFIA

- [1] U. AMALDI: *Rend. Ist. Sup. Sanità*, **21**, 896 (1958).
- [2] J. M. MEEK e J. CRAGGS: *Electrical Breakdown of Gases* (Oxford, 1953), p. 118.
- [3] O. KLEMPERER: *Electron Optics* (London, 1953), p. 88.
- [4] E. D. COURANT, M. S. LIVINGSTON e H. S. SNYDER: *Phys. Rev.*, **88**, 1190 (1952).
- [5] F. B. SHULL, C. E. MACFARLAND e M. M. BRETSCHER: *Rev. Sci. Instr.*, **25**, 364 (1954).
- [6] R. QUERZOLI e A. REALE: *Rend. Ist. Sup. Sanità*, **22**, 427 (1959).