

ISTITUTO NAZIONALE DI FISICA NUCLEARE

Sezione di Trieste

INFN/TC-90/06

10 aprile 1990

A. Fabris, R. Kersevan, A. Massarotti, M. Puglisi, C. Rossi
and G. Torelli

"MISURE PRELIMINARI SU RFQ DI TRIESTE"

1. Introduzione

Nel 1981, presso i laboratori di Los Alamos U.S.A., veniva data la "proof of principle" della possibilita' di funzionamento degli R.F.Q. proposti da Tepliakov e Kapchinskii gia' dal 1970¹.

Da allora gli R.F.Q. si sono sviluppati in tutto il mondo seguendo lo schema originale e cioe' realizzando la struttura acceleratrice mediante 4 settori (i cosiddetti "vanes") che, opportunamente sagomati per creare i campi voluti nella zona accessibile al fascio di particelle, venivano eccitati per mezzo di un'unica cavita' risonante a sua volta eccitata da un complicato sistema di accoppiamenti (dalla cavita' cilindrica a mantello con slot di accoppiamento alla struttura principale realizzata a Los Alamos al sistema 8 x 1 loops proposto e realizzato nel 1983 a Brookhaven, etc.).

La macchina R.F.Q. si dimostro' subito molto interessante come acceleratore lineare di bassa energia vista la sua notevole trasparenza, la sua capacita' a trasportare grosse correnti e soprattutto la sua qualita' di alterare molto poco le caratteristiche di emittanza dei fasci iniettati.

Visto il notevole interesse tecnico, e in parte anche concettuale, che la macchina continuava a suscitare, molti laboratori si sono dedicati a migliorare la macchina stessa ed il passo fondamentale che ha condotto alle macchine di seconda generazione e' stato quello di sostituire i vanes con elementi di linea che, oltre ai tanti altri vantaggi ben noti ai tecnici di radiofrequenza, offrivano quello di essere sagomabili, e con grande precisione, su torni a controllo numerico^{2,3} (i vanes erano sagomati con frese tridimensionali reperibili solo presso grandissimi laboratori). A questo punto gli R.F.Q. divenivano costruibili un po' dovunque, come in effetti e' avvenuto e continua ad avvenire.

Come spesso accade, i miglioramenti tecnologici hanno fatto aumentare le prestazioni attuali e possibili per queste macchine che oggi, infatti, vengono ipotizzate come gli iniettori per i grandi acceleratori, destinati agli studi sulla fusione inerziale.

Oggi stiamo assistendo ad un ulteriore passo in avanti, superando la limitazione, sempre tacitamente accettata, di dover considerare gli R.F.Q. come macchine rigidamente monocromatiche. Cio' era, e rimane, vero per le strutture a vanes. Le strutture a barre consentono di superare questa difficolta'. Sono stati proposti e costruiti⁴ infatti R.F.Q. accordabili con continuita' su bande di frequenza anche superiori ad un'ottava con enorme allargamento delle possibilita' per queste macchine.

Nuove proposte sono allo studio ed e' lecito attenderci che gli anni 90 ci portino qualche importante sorpresa.

2. Parametri di progetto

La teoria del funzionamento degli R.F.Q. e' stata data da Tepliakov e Kapchinskii nel 1970¹ e puo' essere cosi' riassunta^{5,6,7,8}: nell'ipotesi che la lunghezza d'onda del campo foccheggiante - accelerante sia molto grande rispetto alle dimensioni trasverse della zona accessibile al fascio, allora il campo stesso puo' essere fatto derivare da una funzione potenziale che dipende anche dal tempo e che e' rappresentabile analiticamente mediante la serie di T.K.

Una volta che sia verificata questa ipotesi si impone al potenziale reale di coincidere con il termine fondamentale dello sviluppo di T.K. e cio' costituisce il criterio per sagomare, almeno internamente, gli elettrodi.

Nota, e realizzata, la funzione potenziale, i campi vengono ottenuti come gradiente e le equazioni del moto di una particella con carica q e massa M , che viene iniettata lungo l'asse z con velocita' $v_p = c\beta$, divengono:

$$\frac{d^2z}{dt^2} = \frac{q}{2M} AkV \sin(kz) \sin(\omega t + \phi)$$

$$\frac{d^2x}{dt^2} = - \left[\frac{q\chi}{Ma^2} V + \frac{q}{2M} kAV I_1(kx) \cos(kz) \right] \sin(\omega t + \phi)$$

dove:

$k = \frac{2\pi}{\beta\lambda}$ e' il numero d'onda della componente fondamentale dello sviluppo in

armoniche di spazio

V e' la tensione interelettrodica.

A e' il parametro di accelerazione definito da: $A = \frac{m^2 - 1}{m^2 I_0(ka) + I_0(mka)}$

$\chi = 1 - AI_0(ka)$ e' un parametro legato alle proprieta' foccheggianti della struttura.

a e m sono due parametri caratteristici di ciascuna cella (fig. 1).

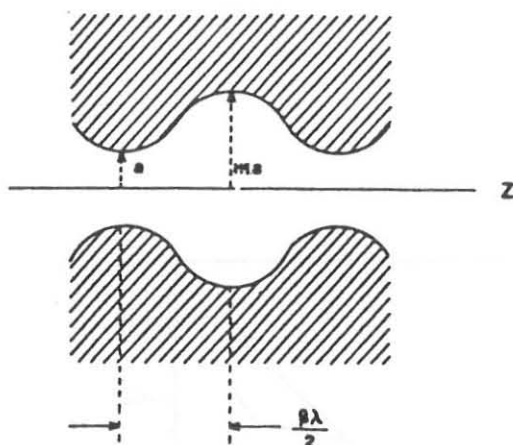


fig. 1 - definizione della lunghezza di cella e dei parametri a e m

Le equazioni del moto possono essere risolte ricorrendo all'elaborazione numerica (PARMTEQ⁷) oppure utilizzando una soluzione analitica approssimata^{9,10}.

La struttura dell'R.F.Q. di Trieste e' stata scelta di tipo "four rods" per due ordini di motivi:

il primo, meccanico, risiede nella relativa semplicita' di lavorazione e assemblaggio delle varie parti componenti;

il secondo, elettromagnetico, risulta evidente tenuto conto del grande intervallo di frequenze che separa il modo fondamentale di risonanza dai modi superiori¹¹, fatto questo che non si verifica invece nelle geometrie "four vanes", in cui si rende necessaria la presenza di soppressori per i modi di dipolo.

La geometria adottata, derivata da geometrie simili^{2,12,13}, ha suggerito in seguito l'evoluzione ad una struttura a frequenza, e quindi energia dei protoni, variabile^{4,14}.

Infatti fissata la geometria della struttura, ad ogni variazione dell'energia rispetto a quella di riferimento corrisponde una variazione della frequenza e della tensione di funzionamento, affinche' il sincronismo tra campo e particella sia assicurato. Piu' esattamente, se μ e' il fattore di scala per l'energia, la tensione andra' moltiplicata per quello stesso fattore, mentre la frequenza varia di $\mu^{1/2}$.

I parametri principali del progetto sono stati determinati tenendo presenti le prestazioni richieste al primo elemento dello schema di iniezione di E.H.F.¹⁵ e l'opportunita' di evitare problemi di radioprotezione. Cio' ha condotto a scegliere il campo di frequenza intorno a 50 MHz, per il quale e' inoltre possibile reperire amplificatori commerciali intorno alla decina di KW, e un'energia massima inferiore a 200 KeV. Di conseguenza sono stati fatti incrementare lentamente il parametro di accelerazione A e la fase sincrona ϕ_s (fig. 2).

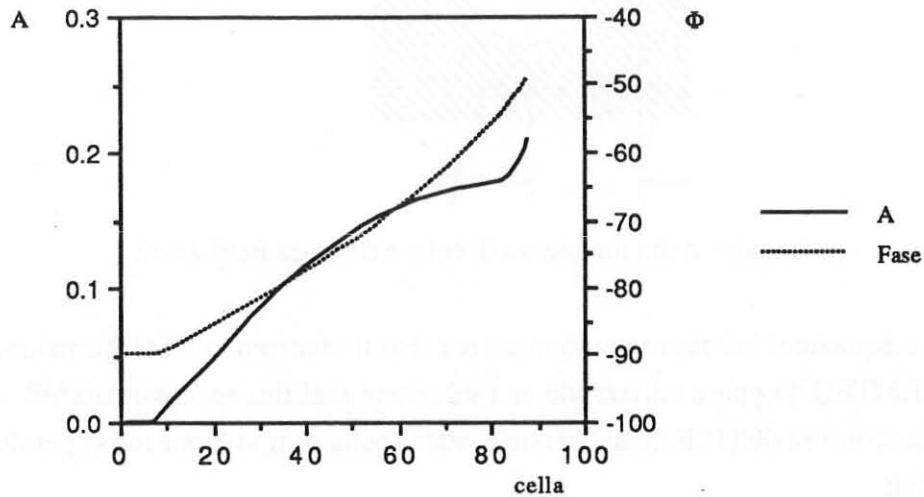


fig. 2 - Andamento del parametro di accelerazione e della fase sincrona.

I parametri risultanti figurano in tab. 1, dove l'estremo inferiore della banda e' determinato dalla minima frequenza di funzionamento dell'amplificatore, mentre l'estremo superiore viene fissato dalla massima energia di iniezione dei protoni generati dalla sorgente duoplasmatron utilizzata. Per questi estremi di funzionamento i dati relativi a frequenza, energia e tensione sono semplicemente scalati dai valori di progetto, mentre i valori di $\frac{\Delta E}{E}$ e della percentuale di trasmissione del fascio risultano da simulazioni numeriche con PARMTEQ.

| Grandezze | Parametri di progetto | Estremo superiore di banda | Estremo inferiore di banda |
|-----------|-----------------------|----------------------------|----------------------------|
|-----------|-----------------------|----------------------------|----------------------------|

| | | | |
|--------------------|-----------|-------|------|
| frequenza (MHz) | 50 | 61.25 | 47 |
| E_{in} (KeV) | 20 | 30 | 17.7 |
| E_{out} (KeV) | 100 | 152 | 90 |
| tensione (KVolts) | 15 | 22.5 | 13.2 |
| fase (ϕ) | 90° - 49° | | |
| numero di celle | 87 | | |
| lunghezza (cm.) | 221 | | |
| raggio medio (cm.) | 0.68 | | |
| I (mA) | 10 | | |
| $\Delta E / E$ (%) | 6 | 6 | 6 |
| trasmissione (%) | 93 | 93 | 91 |

tab. 1 - principali parametri di progetto e di operazione.

Nei grafici successivi sono mostrati lo spettro in fase e la distribuzione nello spazio delle fasi ΔE , $\Delta\phi$ per il fascio, relative ai parametri di progetto (PARMTEQ).

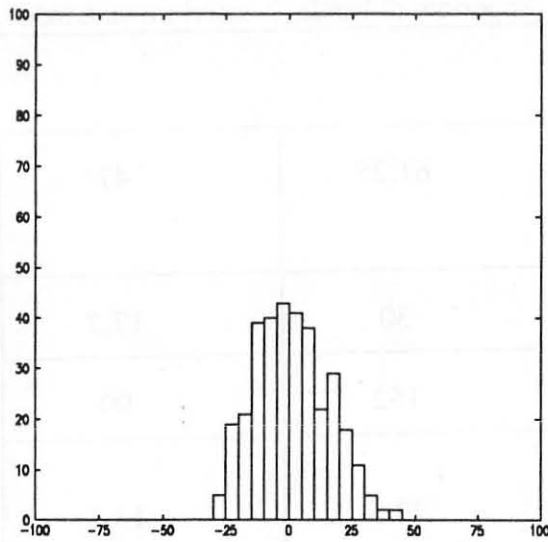


fig. 3 - spettro di fase (cont. vs. gradi)

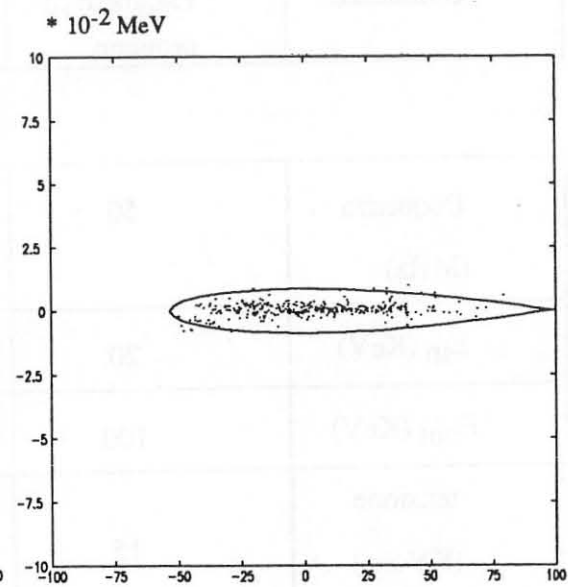


fig. 4 - spazio delle fasi (ΔE vs. $\Delta\phi$)

Per quel che riguarda la dispersione in energia attorno alla particella sincrona si puo' osservare (fig. 5) come piu' del 90 % dello spettro si trovi entro il $\pm 6\%$ dalla energia sincrona (PARMTEQ).

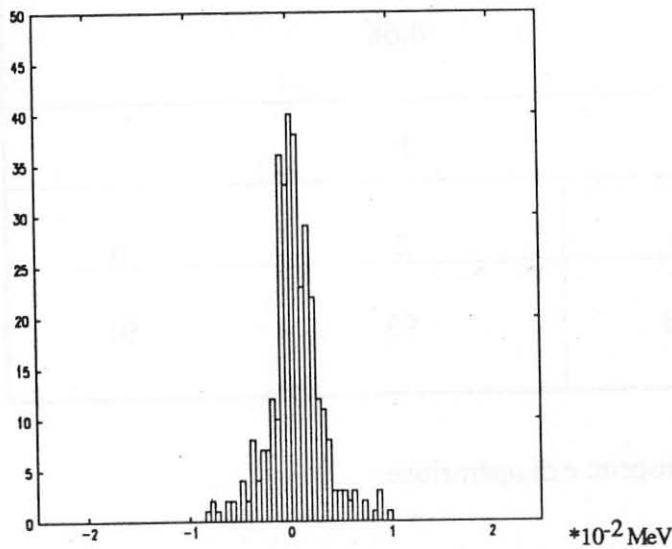


fig. 5 - spettro di energia (cont. vs. ΔE)

3. Parametri della struttura

La struttura risonante utilizzata e' quella, gia' presentata in precedenti lavori^{11,14}, derivante dalla ripetizione di unita' elementari, tutte uguali, assimilabili ciascuna ad una

linea di trasmissione cortocircuitata ad un estremo e caricata capacitivamente all'altro. Si ottiene così una struttura che può essere schematizzata con un risonatore in quarto d'onda accorciato.

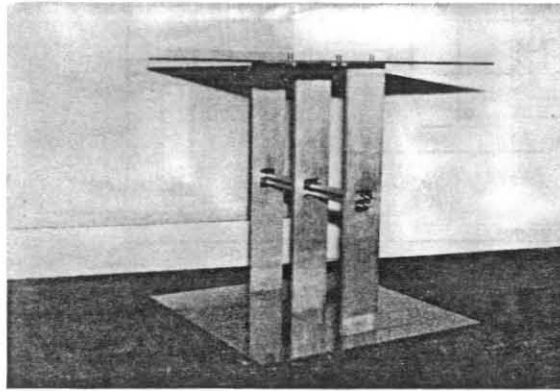


fig. 6 - elemento di struttura risonante a frequenza fissa.

Se si modifica questa struttura, aggiungendo in parallelo agli elettrodi che costituiscono il carico capacitivo una capacità variabile con continuità in un certo intervallo, il risonatore potrà essere sintonizzato entro una certa banda di frequenza (fig. 7)

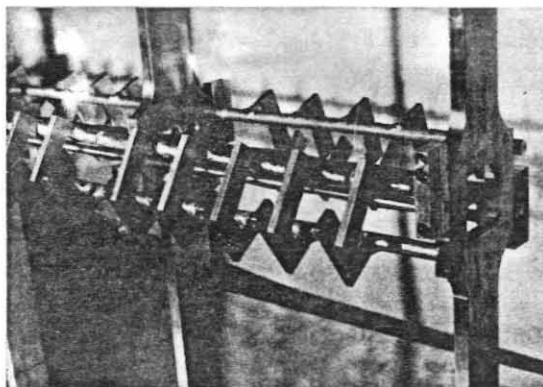


fig. 7 - dettaglio della struttura con capacità variabile.

Con le dimensioni di progetto utilizzate (fig. 8)

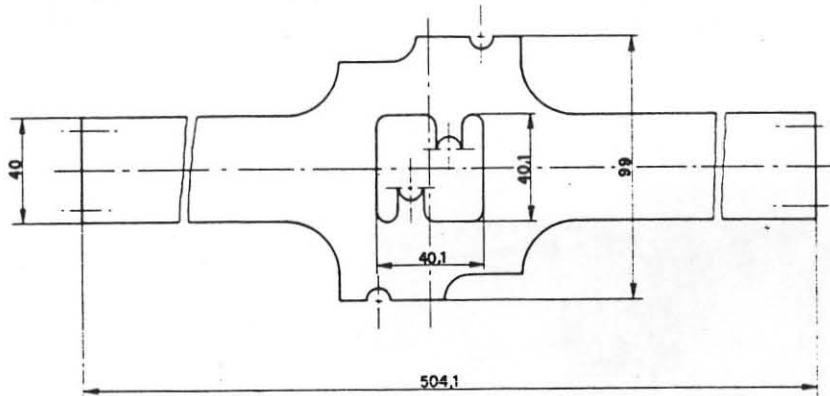


fig. 8 - supporto utilizzato e relative dimensioni

le caratteristiche elettromagnetiche misurate sono risultate le seguenti (tab. 2)

| grandezza | massima capacita' | minima capacita' | condizioni sperimentali |
|--------------------|-------------------|------------------|-------------------------|
| frequenza (MHz) | 44.651 | 56.862 | 52.825 |
| fattore di merito | 3400 ± 100 | 3800 ± 100 | 3700 ± 100 |
| $R_{sh}(\Omega)$ | 36300 ± 240 | 61400 ± 240 | 51000 ± 240 |
| $R_{sh}(\Omega/m)$ | 77400 ± 500 | 130400 ± 500 | 108700 ± 500 |

tab. 2 - parametri misurati

Pur ricoprendo solo parzialmente la banda di frequenze di progetto, si e' ritenuto che l'intervallo di frequenze ottenuto permetta la verifica della validita' della struttura adottata.

D'altra parte la sostituzione delle capacita' variabili in modo da conseguire il funzionamento in un diverso intervallo di frequenze e' una semplice operazione meccanica.

Alla frequenza di 52.8 MHz l'R.F.Q., posto sotto vuoto, e' stato provato fino ad una tensione di 40 KV tra le barre, senza che vi siano state scariche, in presenza di un SWR misurato di 1.09, sono sufficienti meno di 3 KW per raggiungere i 17 KV tra gli elettrodi.

4. Componenti della struttura

La disposizione sperimentale riportata in fig. 9 schematizza i principali componenti su cui si e' operato.

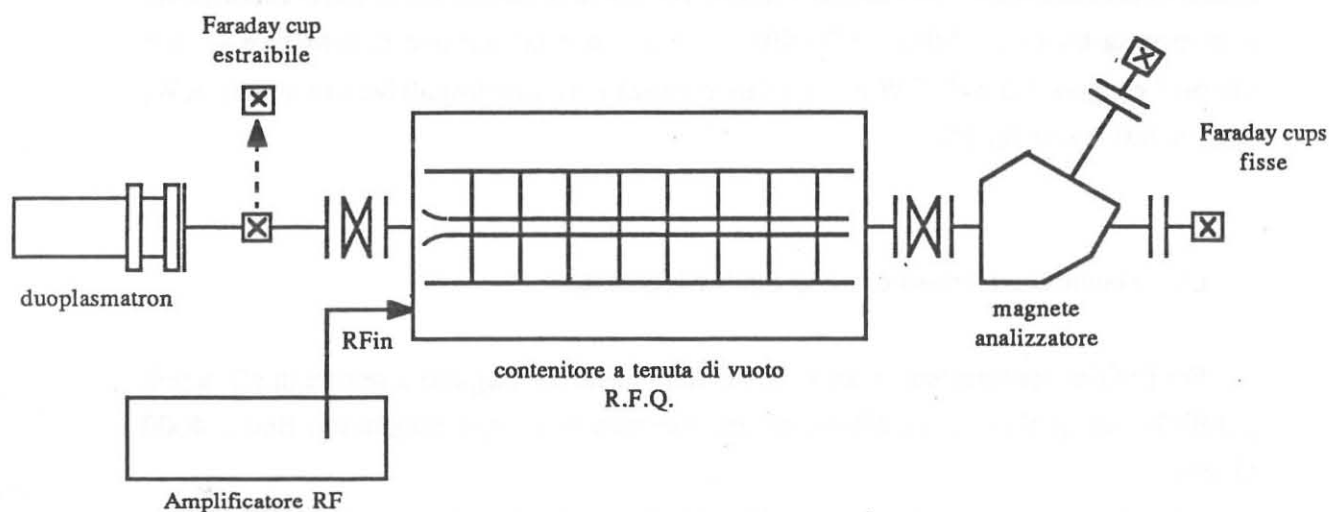


fig. 9

i) - sorgente di ioni

Si tratta di una sorgente commerciale di tipo duoplasmatron costruita dalla ROKION di Darmstadt (modello DP - He - 30 / 40), nella sua versione per gas nobili, azoto e idrogeno, in grado di generare fino a 40 mA di He a 30 KeV, puo' funzionare con tensioni di estrazione variabili tra i 15 KV e i 30 KV.

La sorgente e' in grado di operare in modo continuo e impulsato; in quest'ultima modalita' di funzionamento, che e' quella da noi adottata, l'impulso prescelto viene applicato all'alimentatore della scarica rendendo cosi' impulsivo il regime di ionizzazione del gas.

Sono stati ottenuti i 16 mA di corrente di picco misurati alla faraday cup estraibile, operando a una tensione di estrazione di 22.3 KV con una corrente di scarica di 10 A (impulsi di 40 μ sec. a 10 Hz).

Prima di dover essere sostituito, il filamento di tantalio ha lavorato per un totale di circa 20 ore alla potenza di 180 W di alimentazione, con una pressione di $1.4 \cdot 10^{-1}$ mbar. nella camera di ionizzazione.

ii) - Amplificatore RF

E' un amplificatore commerciale in banda Ia costruito dalla Thomson LGT il cui stadio di potenza monta un tetrodo TH 354. La banda di frequenze in cui e' accordabile e' compresa tra i 48.5 MHz e i 70 MHz, con una banda passante di 6 MHz a +/- 0.5 db, puo' erogare 5.6 KW CW oppure una potenza massima impulsiva di circa 15 KW, con un duty cycle del 1%

iii) - Magnete analizzatore, vuoto e raffreddamento

Per l'analisi spettrometrica del fascio e' stato usato un magnete a settore di 60° a poli paralleli, sul quale e' stata effettuata una taratura di campo magnetico fino a 4000 Gauss.

L'impianto da vuoto e' stato configurato in modo da misurare, in condizioni di lavoro, valori migliori di 10^{-7} mbar. nella zona di rivelazione e di interazione, quando nel canale del fascio della sorgente la pressione era di qualche unita' in 10^{-5} ; cio' ha consentito di raggiungere le tensioni previste tra gli elettrodi praticamente senza bisogno di conditioning.

Per quel che concerne il raffreddamento della struttura accelerante, esso e' stato realizzato con tubi di rame saldati sulle piastre di sostegno degli elettrodi, nei quali possa circolare acqua, ma, a causa dei bassi valori di potenza utilizzati, non e' mai stato attivato.

5. Valori ottenuti

Per verificare che la macchina puo' essere utilizzata a energia variabile, si e' adottata come frequenza di riferimento per il primo test della macchina una frequenza a caso all'interno della banda prevista. A questa frequenza di 52.825 MHz e' stata effettuata una simulazione con PARMTEQ (tab. 3).

| | |
|-------------------------------|------------------------------------|
| frequenza | 52.825 (MHz) |
| E_{in} | 22.3 (KeV) |
| E_{out} | 113 (KeV) |
| tensione | 16.7 (KV) |
| fase | $90^\circ - 49^\circ (\phi^\circ)$ |
| numero di celle | 87 |
| lunghezza | 221 (cm) |
| raggio medio interelettronico | 0.68 (cm) |
| I | 10 (mA) |
| $\Delta E / E$ | 6 (%) |
| trasmissione | 94 (%) |

tab. 3 - principali parametri della simulazione (PARMTEQ) alla frequenza sperimentale

A questa simulazione fanno riferimento i seguenti grafici, le cui grandezze sono riferite alla particella sincrona:

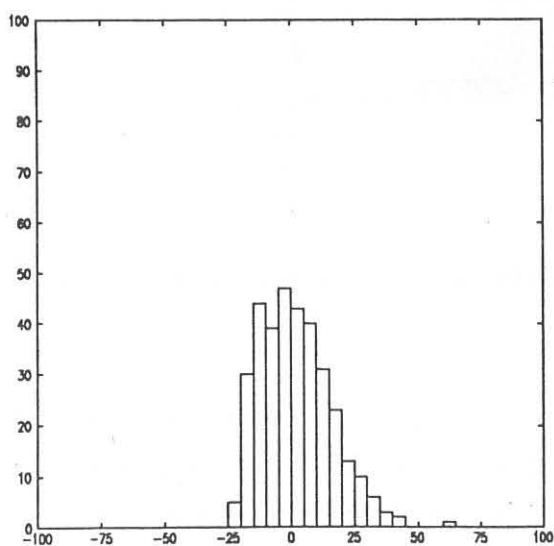


fig. 10 - spettro di fase (cont. vs. gradi)

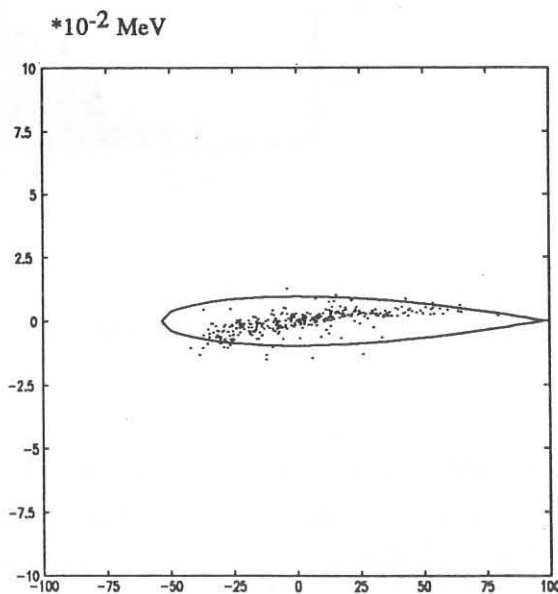


fig. 11 - spazio delle fasi (ΔE vs $\Delta\phi$)

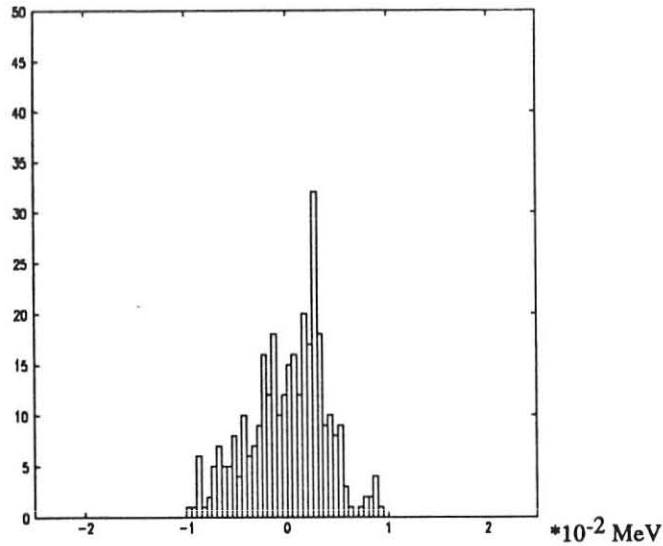


fig. 12 - spettro di energia (cont vs. ΔE)

Lo spettro delle energie all'uscita si presenta fortemente centrato attorno a 113 KeV. (fig. 13).

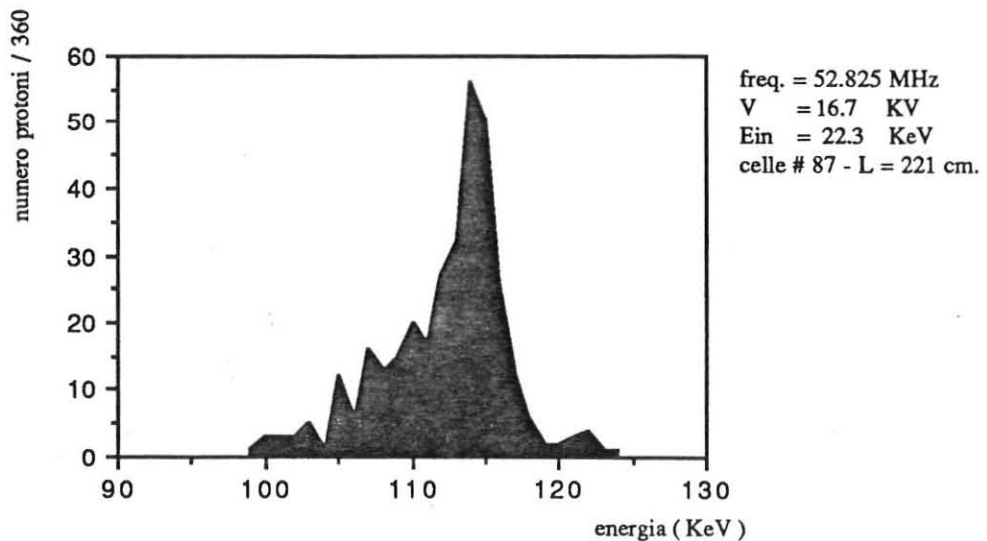


fig. 13 - spettro delle energie alla frequenza di lavoro (simulazione PARMTEQ)

Al fine di mantenere entro livelli bassi le potenze in gioco, si e' adottato un regime di funzionamento impulsato con frequenza di ripetizione di 10 Hz e lunghezza dell'impulso pari a 40 μ sec. per la sorgente di protoni, mentre l'impulso a RF e' stato scelto di 200 μ sec. per consentire una facile discriminazione dal segnale di fascio.

Dai valori stimati di emittanza del fascio alla prima faraday cup, per effetto della mancanza di una ottica di iniezione, si e' valutato che la corrente catturabile e' pari a circa $100 \mu\text{A}$ quando la sorgente eroga una corrente di 15 mA .

Le misure effettuate con il magnete analizzatore all'uscita dell'RFQ hanno indicato per l'energia del fascio un range compreso tra i 108 KeV e i 123 KeV , in pieno accordo con risultati numerici; permangono tuttavia ragionevoli incertezze circa l'accuratezza delle misure stesse, dovuta al basso valore di corrente misurato (circa $80 \mu\text{A}$, vedi fig. 14), a causa della mancanza di un sistema ottico di iniezione non realizzato per ragioni di tempo.

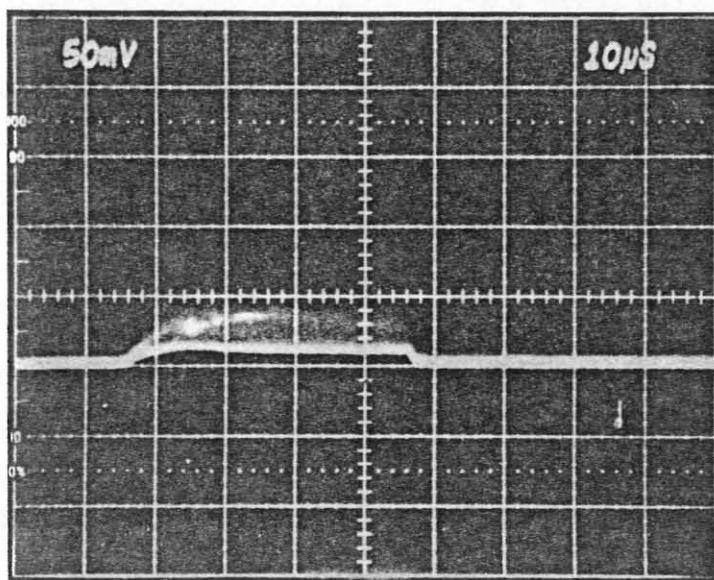


fig. 14 - misura effettuata su un'impedenza di 50Ω (si noti la totale assenza di disturbi RF).

Il completamento dell'esperienza presuppone la necessita' di procedere nel seguente modo:

- a) costruire il sistema ottico di iniezione e di estrazione
- b) realizzare un sistema per la misura dell'emittanza del fascio
- c) tarare piu' accuratamente lo spettrometro di uscita

sara' inoltre opportuna la verifica del funzionamento agli estremi della banda prevista al fine di esplorare le effettive potenzialita' della struttura progettata.

6. Ringraziamenti

Gli autori desiderano ringraziare la Societa' Sincrotrone Trieste che ha messo a disposizione laboratorio e strumentazione per il montaggio e le prime misure sulla macchina. Senza di cio', tenendo conto della disponibilita' di spazio della Sez. I.N.F.N. di Trieste, vi sarebbe stato almeno un anno di ritardo.

Il p.i. M. Rinaldi, successivamente assunto dalla S. T., ha seguito tutto il lavoro fin dall'inizio della realizzazione dei primi modelli delle strutture studiate e ha contribuito alle relative misure con grande interesse e spirito di collaborazione; il suo apporto globale e il suo entusiasmo sono stati di notevole aiuto durante tutto l'arco dell'impresa.

Un particolare ringraziamento va al dott. G. D'Auria che ha fattivamente collaborato nelle fasi di avviamento e di misura.

Gli autori desiderano anche ricordare il contributo del dott. M. Bernardini per i problemi di vuoto e dell'officina meccanica del Dipartimento di Fisica dell'Universita' di Trieste.

Va infine sottolineato il contributo della S.p.a. SICIT di Ponte Messa di Pennabilli (PS) del gruppo IRI - Italstat che, oltre ad aver realizzato gratuitamente il contenitore da vuoto della macchina, ha anche messo a disposizione una borsa di studio annuale per uno degli autori (R. Kersevan).

Un vivo ringraziamento va quindi all'ing. S. Dominici amministratore delegato della societa'.

Bibliografia

1. I.M. Kapchinskii, V.A. Tepliakov
Prib. Tekh. Eksp. N° 4 (1970).
2. H. Klein et al.
IEEE Trans. Nucl. Sci. 28, 2865 (1981).
3. A. Massarotti
I.N.F.N. / TC - 84 / 19
4. A. Schempp
Univ Frankfurt / M. Inst. Angew. Physik int. rep. (1982).
5. K.R. Crandall, R.H. Stokes, T.P. Wangler
Linear Accelerator Conference (1979) unpublished.
6. K.R. Crandall, R.H. Stokes, J.E. Stovall, D.A. Swenson
IEEE Trans. Nucl. Sci. 26, 3469 (1979).
7. K.R. Crandall, R.H. Stokes, T.P. Wangler
IEEE Trans. Nucl. Sci. 28, 1999 (1981).
8. J.L. Laclare, A. Ropert
LNS 063 1 June 1982, Laboratoire National Saturne.
9. M. Leo, R.A. Leo, G. Soliani, M. Puglisi, C. Rossi, G. Torelli
Phys. Rev. A 35 , 393 (1987).
10. M. Leo, R.A. Leo, G. Mancarella, G. Soliani, M. Puglisi
Nuovo Cimento 102 A, 781 (1989).
11. A. Fabris, A. Massarotti, M. Vretenar
New Techniques for Future Accelerators - Plenum N.Y. (1987).

12. P. Junior et al.
IEEE Trans. Nucl. Sci. 28, 1504 (1981).
13. A. Fabris, A. Massarotti
I.N.F.N. / TC - 86 / 16
14. A. Fabris, A. Massarotti
Nucl. Inst. and Meth. A 273 (1988).
15. E.H.F. Design Group
Proposal for a European Hadron Facility
E.H.F. - 87/18 - May 19th 1987. J.F. Crawford SIN, CH - 5231,
Villingen, Switzerland(1987).