

ISTITUTO NAZIONALE DI FISICA NUCLEARE

Sezione di Trieste

INFN/TC-87/13

19 Novembre 1987

A. Fabris, A. Massarotti:

PROPOSTA DI RFQ A ENERGIA VARIABILE

PROPOSTA DI RFQ A ENERGIA VARIABILE

La variazione continua dell' energia delle particelle accelerate da un RFQ e' ottenibile solamente a patto di variare sia la tensione sia la frequenza della macchina.

Vengono presentate alcune strutture per RFQ "four rods" che permettono di ottenere una facile e continua variazione della frequenza di lavoro. Vengono quindi presentati i dati sperimentali delle prove elettriche effettuate sui modelli costruiti e viene proposta la realizzazione di un prototipo per accelerare protoni utilizzando frequenze nel campo dei 50 MHz.

1. INTRODUZIONE.

La teoria e le possibili applicazioni dei quadrupoli a radio frequenza sono ben note e sono state descritte in diversi lavori [1,2,3]. In questi acceleratori, date una frequenza e una tensione di lavoro, si determinano certi profili degli elettrodi, dai quali dipende l'energia ceduta per cella alle particelle che si vogliono accelerare, nonche' le proprieta' di foccheggiamento. Intorno a questa struttura si realizza poi un risonatore che lavora alla frequenza voluta.

E' ben noto che nei limiti della meccanica classica con una struttura dimensionata per accelerare un certo tipo di ioni a una certa energia finale, si possono accelerare utilizzando la stessa frequenza e la stessa tensione nuclei che abbiano lo stesso rapporto "stato di carica / numero di massa", ad esempio D^+ , He^{++} e cosi' via, ottenendo la stessa energia per nucleone [4].

Se invece si cambia il rapporto "stato di carica / numero di massa" e' necessario aumentare o diminuire la tensione tra gli elettrodi, in modo che la singola cella di lunghezza L (variabile da cella a cella) sia percorsa nello stesso tempo $T/2$ (semiperiodo della radio frequenza); in altre parole, come e' ben noto, la lunghezza della cella elementare deve sempre valere $\beta\lambda/2$, dove β e' la velocita' media normalizzata v/c della particella nella cella considerata e λ e' la lunghezza d'onda della radiofrequenza [4].

Ne discende quindi che, se, invece di cambiare la natura della particella che si vuole accelerare, si vuole cambiare l'energia finale di uno stesso tipo di particella, e' necessario variare la tensione per cedere piu' o meno energia. In conseguenza di cio' il tempo di transito in ogni cella

diminuisce o aumenta e perciò diventa necessario variare anche la frequenza perché la singola cella venga percorsa in $T/2$.

2. DISCUSSIONE.

Poiché negli RFQ solitamente la variazione di velocità per cella è piccola, la velocità istantanea delle particelle differisce di poco dalla velocità media in ogni cella. Quindi si ha [1] :

$$(1) \quad \frac{\Delta\beta_n}{\beta_n} \ll 1$$

dove $\Delta\beta_n$ è la variazione della velocità normalizzata nella cella n-esima e β_n è la velocità media normalizzata nella stessa cella.

Sotto questa ipotesi, e ricordando che nel range di energie in cui vengono fatti operare gli RFQ si può usare ancora la meccanica classica, si ricava che la variazione di energia per cella è data da:

$$(2) \quad \Delta E = \frac{\pi}{4} q A V_0 \cos \phi$$

dove q è la carica della particella, A è una quantità che può variare da cella a cella e che dipende dalla geometria della struttura, V_0 è la tensione tra le barre e ϕ è la fase della particella, eventualmente variabile lungo la struttura.

Se ne deduce che, fissata la struttura geometrica, volendo mantenere inalterata la distribuzione della fase lungo la struttura, si può ottenere una variazione di energia solo variando la tensione di lavoro (e ovviamente la frequenza per soddisfare la condizione di sincronismo).

In prima approssimazione possiamo scrivere che la velocità media della particella nella cella $n+1$ è data da:

$$(3) \quad v_{n+1} = v_n + \frac{\Delta E_n}{mv_n}$$

e per la (1) si ha:

$$(4) \quad \frac{\Delta v_n}{v_n} = \frac{\Delta E_n}{mv_n^2} \ll 1$$

Per la condizione di sincronismo si deve avere $\beta_n \lambda / 2 = L_n$; quindi, a struttura fissata, se varia l'energia della particella si dovrà avere:

$$(5) \quad \frac{v_n}{v'_n} = \frac{f_0}{f'_0} = \text{costante per ogni } n$$

Se il guadagno di energia in ogni cella e' trascurabile rispetto all' energia iniziale della particella, come avviene negli RFQ, usando la (3) si ricava che la velocita' nella cella n-esima e' data da:

$$(6) \quad v_n \simeq v_1 \left[1 + \frac{1}{mv_1^2} \sum_{i=1}^{n-1} \Delta E_i \right]$$

Se variamo nella stessa struttura l' energia delle particelle per la (5) e la (6) si dovra' avere:

$$(7) \quad \frac{v_n}{v_n'} = \frac{v_1}{v_1'} \frac{1 + \frac{1}{mv_1^2} \sum_{i=1}^{n-1} \Delta E_i}{1 + \frac{1}{mv_1'^2} \sum_{i=1}^{n-1} \Delta E_i'} = \text{costante}$$

Se chiamiamo μ il rapporto tra le energie raggiunte nei due casi:

$$(8) \quad \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \Delta E_i}{\sum_{i=1}^{n-1} \Delta E_i'} = \mu$$

dalla (7) si ricava che :

$$(9) \quad \frac{v_n}{v_n'} = \frac{f_0}{f_0'} = \mu^{1/2}$$

Quindi possiamo concludere che se si vuole aumentare di un fattore μ l' energia finale bisognera' in prima approssimazione aumentare dello stesso fattore la tensione tra le barre e l' energia di iniezione e di un fattore $\mu^{1/2}$ la frequenza di lavoro.

Consideriamo l' equazione che regola il moto trasversale per particelle in prossimita' dell' asse della macchina:

$$(10) \quad \frac{d^2 \xi}{d\alpha^2} = - [B \sin(2\pi\alpha + \phi) + \Delta] x - \gamma x \cos(4\pi\alpha + \phi)$$

dove :

$$\xi = \lambda x, \quad \alpha = t/T$$

$$(11) \quad B = \frac{XqV_0}{m_0c^2} \left(\frac{\lambda}{a} \right)^2$$

$$(12) \quad \Delta = \frac{\pi^2}{2} \frac{AV_0q}{\beta^2 m_0 c^2} \sin \phi$$

$$(13) \quad \gamma = \frac{\Delta}{\sin \phi}$$

Dove A e' quello gia definito e X e' nuovamente una quantita' che puo' cambiare da cella a cella e che dipende dalla geometria della struttura analogamente ad A. B e' legato all' effetto foccheggiante e Δ all' effetto defoccheggiante. La soluzione dell' equazione del moto trasversale sara' convergente o divergente in dipendenza ai valori numerici assunti dalle quantita' B e Δ . Nell' ipotesi di mantenere inalterata la struttura geometrica e di variare l' energia delle particelle variando tensione e frequenza nel modo specificato sopra, sostituendo nella (11) e nella (12) la nuova tensione e la nuova frequenza, si ricava che i valori di B e di Δ rimangono invariati. Si puo' quindi concludere che in prima approssimazione anche la stabilita' trasversale viene mantenuta.

Dalla discussione fin qui fatta, si ricava inoltre che il fattore μ risulta essere un fattore di scala della macchina.

3. STRUTTURE PROPOSTE E DATI SPERIMENTALI.

In precedenti lavori [5,6] e' stata presentata una struttura per RFQ che e' riportata in fig.1. Le quattro barre che costituiscono gli elettrodi dello RFQ sono il carico capacitivo dell'induttanza formata dalla coppia di supporti che reggono le barre. Se si ripete un certo numero di volte questa unita' di base, si ottiene la struttura riportata in fig.2 che e' un' unica struttura risonante in cui le barre costituiscono il carico capacitivo dell' induttanza dovuta ai supporti che le reggono.

La capacita' tra le barre e' evidentemente determinata dall' ottica della macchina per cui, data la frequenza, e' determinata anche l'induttanza; e' allora necessario che l' induttanza sia realizzata in maniera che sia sempre verificato un ragionevole compromesso tra le dimensioni dei supporti. Ad esempio, bisogna fare in modo che la distanza tra i supporti sia tale che l' ipotesi che non vi siano fenomeni propagativi lungo le barre sia verificata, che la loro altezza non sia troppo grande e quindi le dimensioni della macchina siano ragionevoli e cosi' via. Cio' diviene abbastanza vincolante quando si vogliono anche ottimizzare le perdite variando, con riferimento alla fig.1, l' altezza "a", la larghezza "b", e la

distanza "l" dei supporti. Si tenga presente che, siccome la frequenza di risonanza e' fissata, solo due dei tre parametri sono indipendenti.

Sono stati realizzati e studiati diversi modelli in alluminio. Su di essi sono stati montati sia elettrodi a diametro costante, sia elettrodi modulati approssimando una possibile profilatura per essi. I valori qui presentati della frequenza di risonanza f_0 , del fattore di merito Q e della resistenza equivalente R_{sh} sono tutti relativi a strutture con elettrodi profilati.

Le dimensioni del modello in fig.2 sono:

$a=240$ mm., $b=80$ mm., $l=240$ mm. , con le quali si ottiene:

$$f_0 = 76.30 \text{ MHz}$$

$$Q = 2240$$

$$R_{sh} = 75500 \text{ } \Omega\text{xm}$$

con $b=40$ mm. si ha:

$$f_0 = 70.60 \text{ MHz}$$

$$Q = 2900$$

$$R_{sh} = 90750 \text{ } \Omega\text{xm}$$

Per potersi svincolare da tutte le limitazioni anzidette, e' stata realizzata la struttura di fig. 3a e 3b. Alla struttura di base sono stati aggiunti , lungo di essa e da entrambi i lati , due capacita' variabili : le due parti che costituiscono ognuna di esse sono mobili e sono collegate a supporti alterni. Le due capacita' aggiunte si sommano a quella preesistente senza pero' perturbare il campo elettrico nella zona di interazione. In questo modo si puo' variare con continuita' la frequenza di lavoro semplicemente variando il valore della capacita' esterna.

Con $a=240$ mm., $b=40$ mm., $l=240$ mm., si ha:

$$f_0 = 59.41 \text{ MHz}$$

$$Q = 2790 \quad (\text{in condizione di minima capacita'})$$

$$R_{sh} = 71540 \text{ } \Omega\text{xm}$$

e

$$f_0 = 46.23 \text{ MHz}$$

$$Q = 2430 \quad (\text{in condizione di massima capacita'})$$

$$R_{sh} = 46400 \text{ } \Omega\text{xm}$$

La variazione di frequenza ottenuta e' pari a circa 13 MHz. Si noti l' effetto della capacita' minima residua introdotta dai due condensatori aggiunti.

4. PROGETTO RFQ TRIESTE.

Con questo tipo di struttura e' stata proposta la realizzazione di un prototipo di RFQ per accelerare protoni con una frequenza nel range dei 50 MHz. Tale RFQ verra' costruito in rame il che permettera' di ottenere un aumento di un fattore 1.5 (misurato) per R_{sh} rispetto ai modelli in alluminio costruiti per gli studi preliminari. Nella tabella seguente sono riportati i principali parametri di progetto a 50 MHz:

particelle	protoni	
frequenza	50	MHz
tensione tra gli elettrodi	18	kV
numero di celle	70	
lunghezza totale	2.23	m.
raggio medio	6	mm.
valore massimo di campo E_{max}	5	MV/m
corrente d' ingresso	10	mA
energia di ingresso	30	keV
energia di uscita	140	keV
$\phi (^{\circ})$	-90 ^o / -45 ^o	

Si puo' ritenere che variando la frequenza di lavoro fra 47 e 59 MHz si potra' ottenere una variazione pari a circa un fattore 1.5 dell' energia finale tra gli estremi della banda di frequenze ottenuta. Tale RFQ e' in progetto presso la Sezione INFN del Dipartimento di Fisica dell' Universita' di Trieste e si prevede entrera' in funzione entro la prima meta' del 1988.

5. CONCLUSIONI.

La variazione di frequenza ottenibile con questo modello dipende ovviamente dal valore della capacita' aggiunta. Per ottenere quindi una struttura che lavori tra due frequenze f_1 e f_2 bastera' dimensionare le due capacita' variabili in maniera opportuna. L' aumento delle perdite causato dall' aumento della capacita' puo' essere contenuto in limiti accettabili e la variazione continua della frequenza di lavoro e' ottenibile in maniera abbastanza semplice.

Si puo' quindi ritenere che con elettrodi opportunamente calcolati per garantire il focheggiamento trasversale in tutto il campo di frequenza e quindi di tensione necessario, si puo' realizzare un RFQ a energia

variabile. In ogni caso rispetto agli RFQ a cavita' o a barre non accordabili si ha il grande vantaggio che sia la frequenza che la tensione non sono critiche.

6. RINGRAZIAMENTI.

Gli autori desiderano ringraziare il prof. Mario Puglisi per le utili discussioni sull'argomento e il P.i. Mauro Rinaldi che ha validamente contribuito alle misure e alla realizzazione dei modelli.

7. BIBLIOGRAFIA.

- 1) M.Puglisi, THE RADIOFREQUENCY QUADRUPOLE LINEAR ACCELERATOR, Hadronic Physics at Intermediate Energy, pg.387426, T.Bressani,R.A.Ricci (editors), Elsevier Science Publishers B.V., 1986.
- 2) M.Leo, R.A.Leo, G.Soliani, M.Puglisi, C.Rossi e G.Torelli, ANALYTICAL STUDY OF THE EQUATION FOR THE LONGITUDINALE MOTION OF PARTICLES IN A RADIO-FREQUENCY-QUADRUPOLE ACCELERATOR , Physical Review A, Vol.35,No.1, pg. 393-397, January 1987.
- 3) H.Klein, DEVELOPMENT OF DIFFERENT RFQ ACCELERATING STRUCTURES AND OPERATION EXPERIENCE, IEEE Trans. Nucl. Sci., Vol. NS 30, N° 4, pt 2, pg. 3313-22, August 1983.
- 4) T.P.Wangler and R.H.Stokes, THE RADIO-FREQUENCY QUADRUPOLE LINEAR ACCELERATOR, IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. NS 28, N° 2, April 1981.
- 5) A.Fabris, A.Massarotti, M.Vretenar, A MODEL OF FOUR ROD RFQ, Proceedings of the Seminar on New Techniques for Future Accelerators, Erice (Italy) 11-17 May 1986. In pubblicazione (Plenum N.Y.).
- 6) A.Fabris, A.Massarotti, MODELLO DI RFQ A QUATTRO BARRE, INFN/TC-86/16, Ottobre 1986.

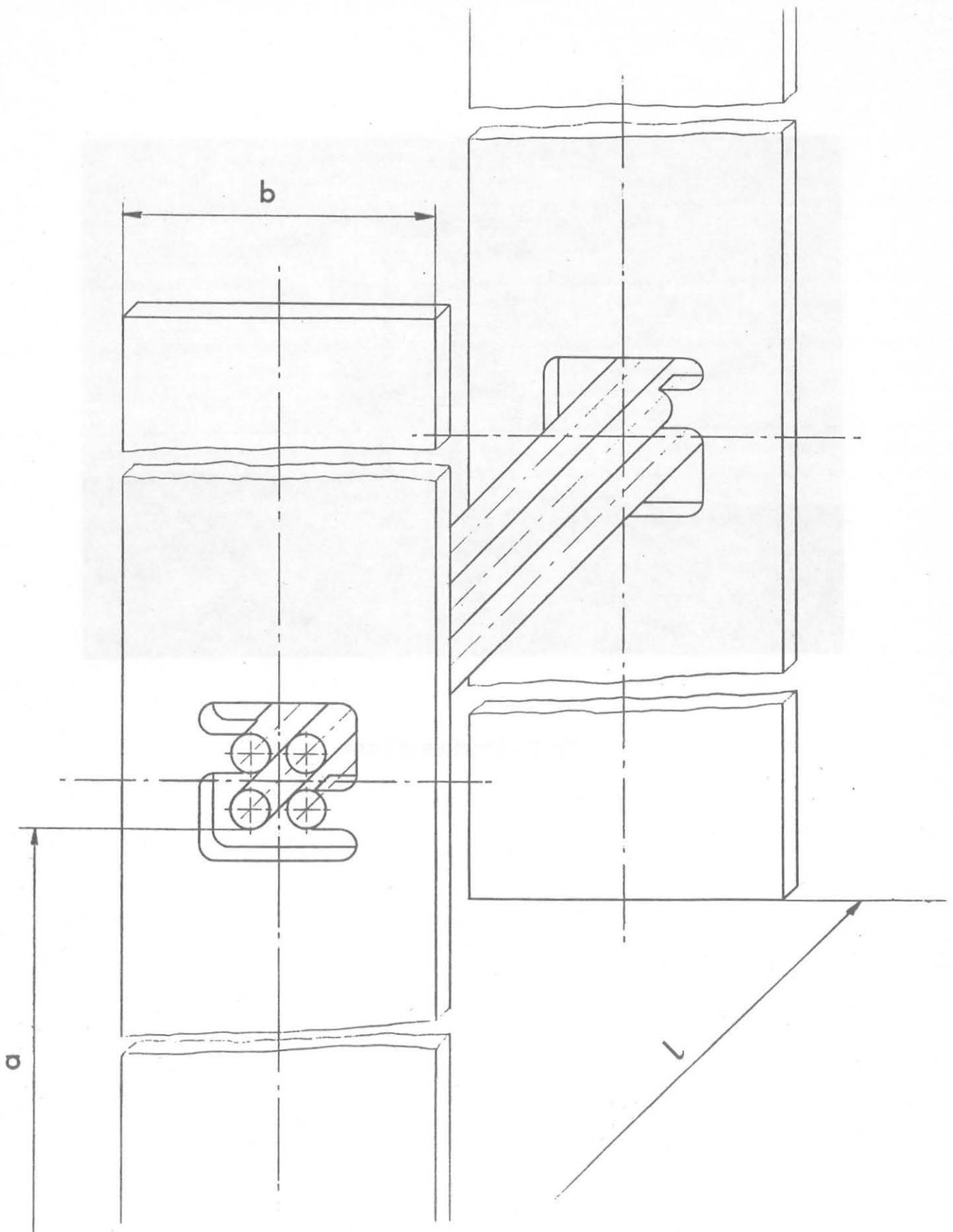


Fig. 1 - Cella unitaria

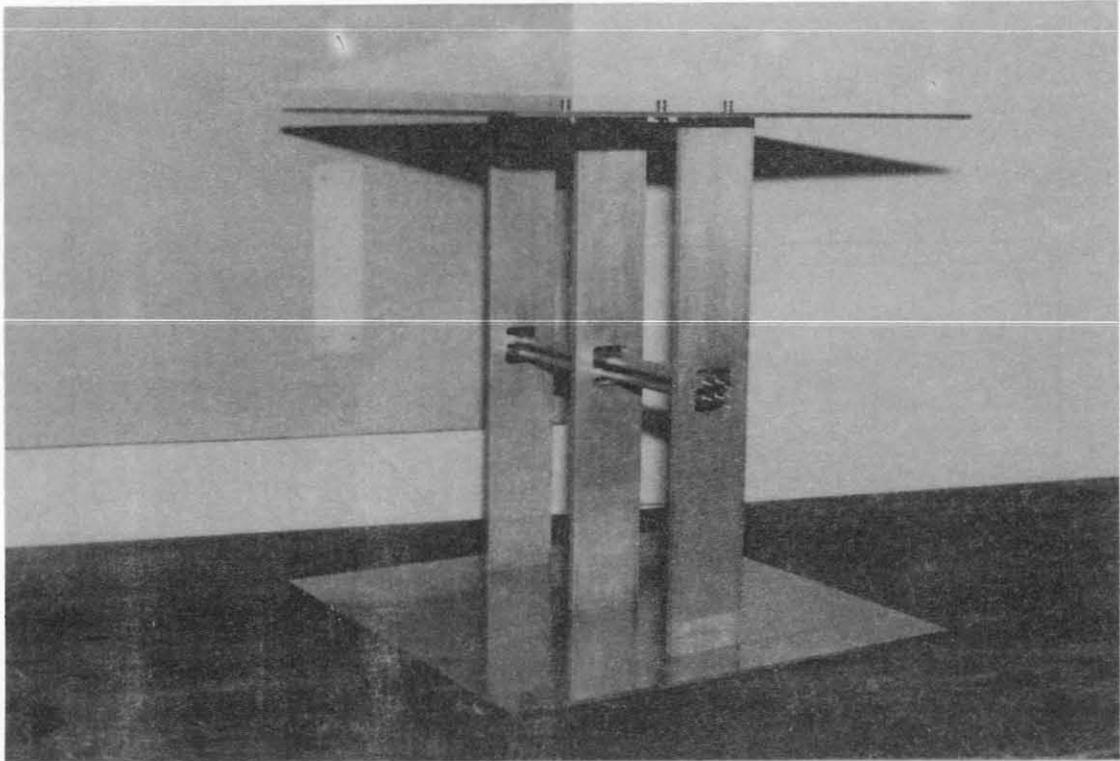


Fig. 2 - Struttura di base

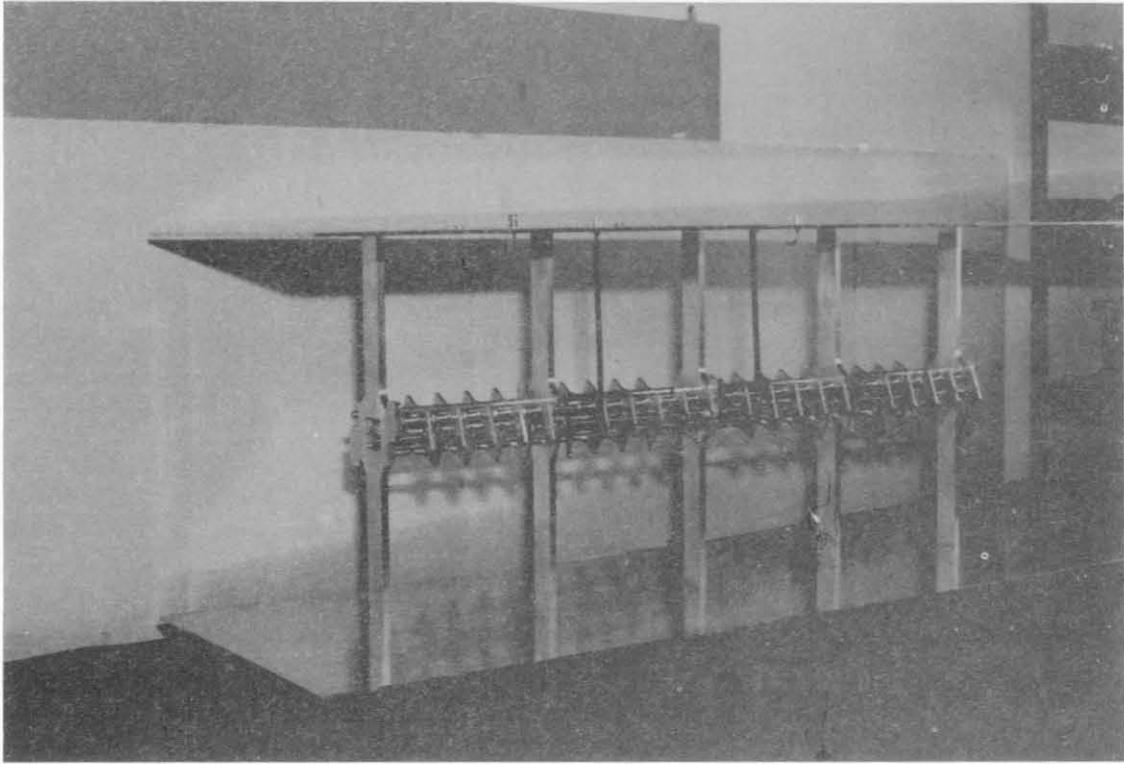


Fig. 3a - Struttura a frequenza variabile

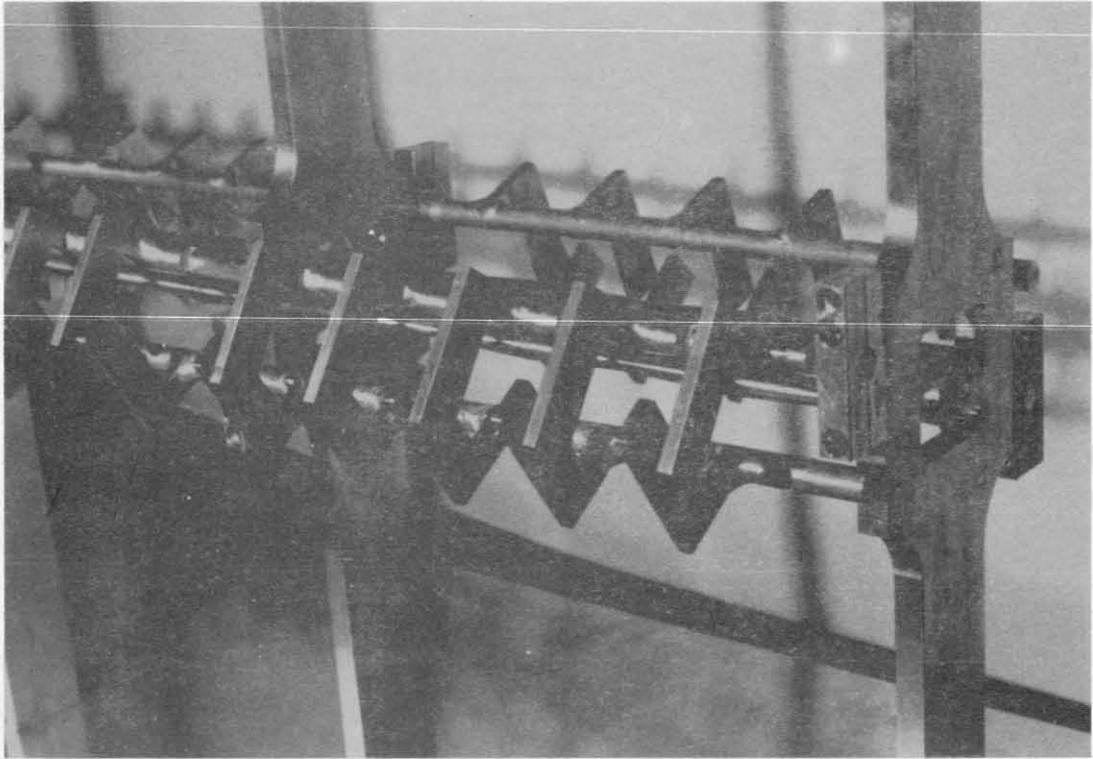


Fig. 3b - Particolare della struttura in figura 3a.