

ISTITUTO NAZIONALE DI FISICA NUCLEARE

Sezione di Milano

INFN/TC-88/13
11 Aprile 1988

M. Ferrario, L. Ferrucci e E. Haebel:

CAVITA' SUPERCONDUTTRICI A TRE CELLE.

Cavità superconduttrici a tre celle

M. Ferrario¹⁾, L. Ferrucci¹⁾, E. Haebel²⁾

1) INFN Sezione di Milano - 2) CERN-EF-RF

Riassunto.

La questione *quante celle dovrebbe avere una cavità superconduttrice per accelerazione ?* è ancora oggetto di vivaci discussioni e la risposta non è affatto semplice. In questo lavoro presentiamo un confronto tra una cavità a 4 celle ed una cavità a 3 celle. Lo smorzamento dei modi parassiti risulta essere più semplice in una cavità a 3 celle.

Introduzione.

Una cavità acceleratrice a radio frequenza (RF) è composta da una o più celle risonanti accoppiate in cui un opportuno generatore mantiene un campo accelerante ad una frequenza fissata [1]. A tale struttura vengono aggiunti dei tubi per permettere l'iniezione e l'estrazione del fascio (BT) (fig. 1).

In una cavità superconduttrice (SC) è possibile immagazzinare energia elettromagnetica quasi senza perdite sulle pareti. Questa caratteristica permette migliori prestazioni del modo accelerante ma ha anche conseguenze dannose. In simili condizioni, infatti, i modi a frequenze superiori eccitati dal passaggio del fascio possono raggiungere intensità tali (Resonant Build-Up) da perturbare la dinamica del fascio stesso. Si rendono perciò necessari dei dispositivi addizionali, gli accoppiatori per i modi superiori (HOM coupler), che consentono di estrarre l'energia dei modi parassiti, al fine di minimizzare gli effetti perturbativi [2]. Per attenuare un modo in maniera accettabile, è necessario avere una intensità sufficiente, nella posizione in cui è montato l'accoppiatore, della componente del campo al quale il dispositivo è sensibile. Per questo motivo la posizione dell'accoppiatore sulla cavità deve essere scelta accuratamente. La soluzione più semplice sarebbe quella di collocare un accoppiatore su ciascuna cella della cavità.

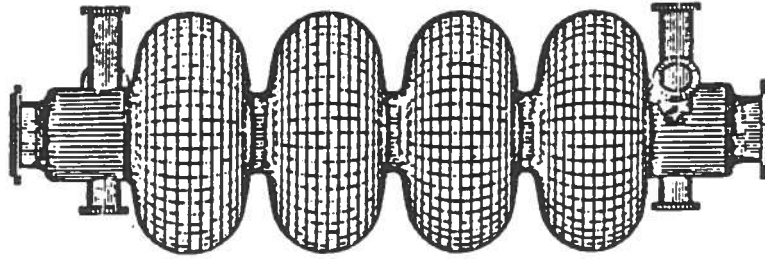


Fig.1: Cavità in Niobio (350 MHz) progettata per la seconda fase del LEP

Tuttavia allo stato attuale dell'arte le limitazioni tecniche dominanti sono dovute al riscaldamento dei difetti superficiali da parte dei campi che potrebbe generare una brusca transizione allo stato normal-conduttivo (NM) e di conseguenza una improvvisa caduta del gradiente accelerante (Quench). Per il buon funzionamento di una cavità SC è perciò indispensabile ridurre al minimo le imperfezioni della superficie delle pareti, e ciò suggerisce di ridurre il numero delle saldature nelle zone in cui il campo è intenso. La soluzione adottata al CERN prevede infatti il montaggio degli accoppiatori sui tubi di iniezione del fascio (BT), il più vicino possibile alla cella terminale.

In fase di progettazione di una cavità a più celle si cerca di trovare, attraverso simulazioni al computer, un disegno tale che per ogni HOM "pericoloso", esista un campo sufficiente nella posizione degli accoppiatori [3]. Lo studio è complicato dal fatto che la presenza dei BT cambia la frequenza della cella terminale e può portare ad una debole eccitazione della cella stessa. Si rende perciò necessario modificare la forma della cella terminale per rendere uniforme la distribuzione dei campi all'interno della cavità. Non sempre tuttavia tali correzioni portano a buoni risultati.

Le prestazioni di una cavità dipendono anche dal numero di celle accoppiate in una singola struttura. La domanda *quante celle dovrebbe avere una cavità SC?* è ancora oggetto di vivaci discussioni e la risposta non è affatto semplice. Ragioni economiche, ad esempio, suggeriscono di accoppiare il maggior numero possibile di celle in ciascuna cavità. In questo modo, per una data tensione accelerante decresce il numero delle strutture di servizio necessarie, spesso molto costose come ad esempio il sistema di alimentazione RF o l'impianto per il vuoto. Al contrario ragioni tecniche suggeriscono di ridurre il numero di celle per cavità. La caratteristica più pericolosa nelle strutture lunghe è infatti la possibilità di avere "intrappolamento" nelle celle centrali di alcuni modi superiori eccitati dal passaggio del fascio che non possono essere smorzati dagli accoppiatori. Inoltre la sensibilità alle tolleranze meccaniche di una cavità cresce circa come il quadrato del numero di celle accoppiate.

Negli ultimi anni sono state sviluppate e misurate cavità a cinque celle (Cornell e Saclay) e a quattro celle (CERN). In questo lavoro, dopo avere introdotto le grandezze caratteristiche di una cavità, presentiamo un confronto fra una cavità a tre celle, disegno non ancora studiato, e la cavità a quattro celle sviluppata al CERN per il collider di elettroni e positroni (LEP) ed il cui impiego è previsto anche all'interno del progetto ELFA (Electron Laser Facility for Acceleration) di Milano. Data la complessità del disegno, lo studio è stato effettuato con simulazioni al calcolatore, usando i programmi per il calcolo dei campi all'interno delle cavità SUPERFISH [4] ed URMEL [5]. I risultati ottenuti per la cavità a quattro celle sono in buon accordo con le misure effettuate in laboratorio su un prototipo.

1. Cavità con N celle accoppiate.

Consideriamo una cavità composta da N celle risonanti eccitata da un unico generatore RF nel modo TM^{010} . Questo modo ha un campo elettrico longitudinale massimo sull'asse della cavità, circondato dalle linee del campo magnetico che raggiunge la massima intensità in prossimità delle pareti della cavità (fig.2).

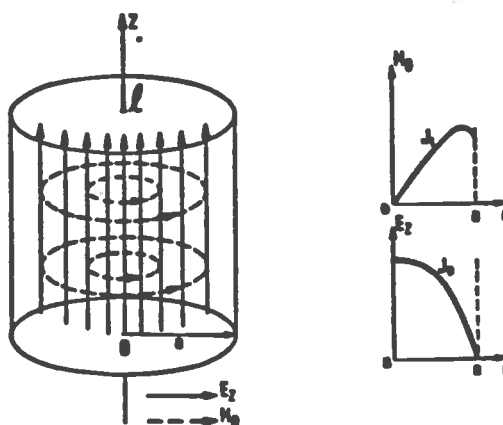


Fig.2: Modo TM^{010} in una cavità cilindrica

Si può dimostrare [6] che in una simile struttura la legge di dispersione è data dalla relazione:

$$\omega_\varphi^2 = \omega_o^2 [1 + K(1 - \cos\varphi)] \quad (1.1)$$

dove $\varphi = n\pi/N$ con $n = 1, \dots, N$, ω_o è la frequenza di risonanza del modo TM^{010} nella singola cella e K è il parametro di accoppiamento delle celle:

$$K \equiv \frac{2(\omega_\pi - \omega_o)}{\omega_\pi + \omega_o} \quad (1.2)$$

il cui valore dipende dalla geometria della cavità ed in particolare dal diametro delle aperture delle celle (Iris).

IL significato della (1.1) è che il modo TM^{010} che in una singola cella chiusa ha una ed una sola frequenza di risonanza ω_o , in una cavità a N celle si divide in N frequenze che giacciono sulla curva di dispersione (1.1)(fig.3).

Tanto più le celle sono accoppiate, tanto più le N frequenze sono separate e diminuisce la sensibilità alle tolleranze meccaniche della cavità.

Il campo elettrico assiale in una cavità ad N celle è:

$$E_i(n, t) = E_o \sin\left(\frac{2i-1}{2}\varphi\right) \cos \omega_n t \quad (1.3)$$

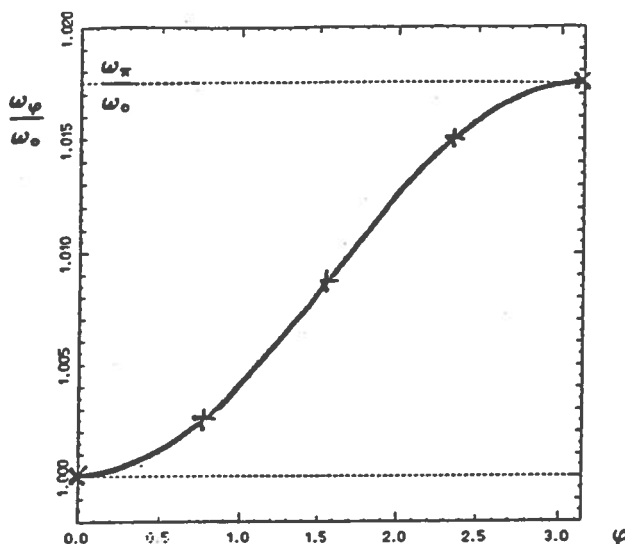


Fig.3: Curva di dispersione

dove E_0 è il massimo campo assiale ed $i = 1, \dots, N$ indica la cella i -esima.

Nel modo π , quando cioè $n = N$ e quindi $\varphi = \pi$ si ha:

$$\omega_{\pi}^2 = \omega_0^2(1 + 2K) \quad (1.4)$$

il campo oscilla alla frequenza più alta e si hanno le migliori condizioni per l'accelerazione. Il campo elettrico assiale per $N = 4$ assume nelle 4 celle, nell'istante in cui è massimo rispettivamente i seguenti valori (fig.4):

$$(+E_0, -E_0, +E_0, -E_0)$$

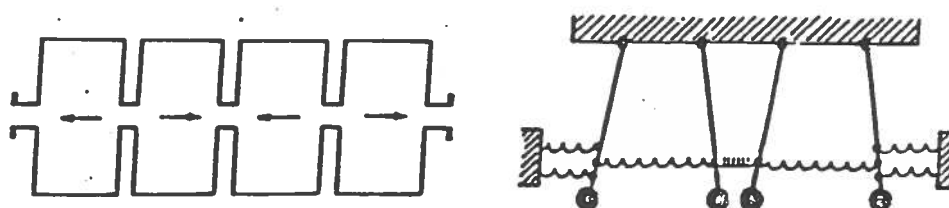


Fig.4: Catena di 4 cavità cilindriche debolmente accoppiate oscillanti nel modo π ed analogia meccanica.

Si noti che mentre un elettrone con velocità c attraversa una cella di lunghezza L nel tempo:

$$t = L/c \quad (1.5)$$

la fase ϕ del campo nella cella successiva è cambiata secondo la relazione:

$$\phi/2\pi = t/T \quad (1.6)$$

da cui:

$$t = T\phi/2\pi = \phi/2\pi\nu \quad (1.7)$$

La lunghezza della cella deve essere tale che un elettrone trovi il campo accelerante sempre con la stessa fase; eguagliando la (1.5) e la (1.7) si ha perciò:

$$L = \lambda\phi/2\pi \quad (1.8)$$

Se si sceglie il modo accelerante π , cioè $\varphi = \pi$ la lunghezza di ciascuna cella deve essere:

$$L = \lambda/2 \quad (1.9)$$

Ad esempio se $\nu = 350 \text{ MHz}$ come nel nostro caso $L = 43 \text{ cm}$

2. Grandezze caratteristiche di una cavità per accelerazione.

Le grandezze con le quali si usa caratterizzare una cavità per accelerazione che definiremo in questo paragrafo, sono, in generale, legate al rendimento del processo di trasformazione dell'energia RF, prove-

niente da un opportuno generatore, in un campo elettromagnetico che interagisca con le particelle [7].

Il *fattore di qualità* di una cavità è:

$$Q \equiv \omega W / P_d \quad (2.1)$$

dove ω è la frequenza del modo considerato, W l'energia del campo elettromagnetico e P_d la potenza RF dissipata nelle resistenze di perdita (riscaldamento per effetto Joule delle pareti). Tale quantità adimensionale è una misura dell'efficienza di immagazzinamento dell'energia da parte della cavità: un valore elevato di Q significa che è possibile mantenere un regime con basse perdite in cui l'energia immagazzinata nel campo è elevata.

La *resistenza shunt* definita nel modo seguente:

$$R_{sh} \equiv P_d \Delta E^2 / q^2 \quad (2.2)$$

lega il guadagno di energia ΔE di una particella con carica q che attraversa la cavità, con la potenza RF dissipata P_d per mantenere il campo accelerante. Ha le dimensioni di una resistenza e viene misurata in Ohm (Ω).

Introducendo la *tensione accelerante*:

$$V_{acc} \equiv \Delta E / q \quad (2.3)$$

è possibile ridefinire la (2.2) nel modo seguente:

$$R_{sh} \equiv V_{acc}^2 / P_d \quad (2.4)$$

La resistenza shunt è una misura dell'attitudine della cavità a convertire la potenza di ingresso in tensione accelerante, deve perciò essere la più alta possibile. Spesso è più utile esprimere la (2.4) riferita ad una lunghezza unitaria di sezione accelerante, ovvero:

$$r_{sh} \equiv E_{acc}^2 / p_d \quad (2.5)$$

in cui p_d è la potenza dissipata per unità di lunghezza attiva $L_{act} \equiv (L_{tot} - L_{BT})$ e

$$E_{acc} \equiv V_{acc} / L_{act} \quad (2.6)$$

è il campo elettrico accelerante effettivo. In questo caso la (2.5) è misurata in Ω/m .

La quantità:

$$R/Q \equiv R_{sh}/Q = V_{acc}^2 P_d / \omega W P_d = V_{acc}^2 / \omega W \quad (2.7)$$

lega il valore della tensione accelerante V_{acc} all'energia W del campo presente nella cavità ed è indipendente dalle perdite. Spesso si usa definire il rapporto (2.7) per unità di lunghezza attiva:

$$r/q \equiv E_{acc}^2 / \omega w \quad (2.8)$$

dove w è l'energia immagazzinata per unità di lunghezza, l'unità di misura è: Ω/m . Un valore più alto di r/q indica che a parità di campo accelerante è necessaria meno energia per unità di lunghezza, deve perciò essere il più alto possibile per il modo accelerante, ed il più basso possibile per tutti gli altri modi.

Come abbiamo già detto nella progettazione di una cavità RF superconduttrice è indispensabile ridurre al minimo le intensità di picco E_{peak} ed H_{peak} dei campi elettrici e magnetici sulle pareti della struttura, responsabili del riscaldamento dei difetti superficiali e contemporaneamente aumentare il campo accelerante E_{acc} . Una misura di questa operazione è data dai rapporti E_{peak}/E_{acc} e H_{peak}/E_{acc} .

3. Progetto di una cavità a tre celle.

Abbiamo iniziato la ricerca di un progetto di una cavità a tre celle che avesse la stessa sensibilità alle tolleranze meccaniche e lo stesso fattore di accoppiamento K della cavità a quattro celle del CERN. Riducendo il raggio degli Iris da 12.052 cm a 10.472 cm ed il raggio dei Beam Tubes da 14.320 cm a 11.170 cm è stato possibile ottenere un valore più alto del rapporto R/Q per il modo fondamentale, valori inferiori dei due rapporti E_{peak}/E_{acc} e H_{peak}/E_{acc} , ma sfortunatamente si è osservato una forte degradazione delle caratteristiche dei modi superiori. Per le cavità CERN gli accoppiatori dei modi superiori sono già stati costruiti ed è stato possibile misurare il $Q_{ext} \equiv \omega W/P_{d,ext}$, dove $P_{d,ext}$ è la potenza estratta dall'accoppiatore. Per stimare il valore del Q_{ext} nel caso delle tre celle ($Q_{ext,3}$), abbiamo usato il seguente approccio: per un dato accoppiatore, sensibile alla componente E_r del campo elettrico, la potenza in uscita per un dato modo è proporzionale a E_r^2 nella posizione dell'accoppiatore (*on coupler*). Per rendere possibile il confronto fra le tre e le quattro celle, abbiamo calcolato tale valore riferito ad un Joule di energia immagazzinata. Confrontando questi valori è stato possibile calcolare il $Q_{ext,3}$ per ogni modo a partire dal Q_{ext} misurato nelle quattro celle ($Q_{ext,4}$) secondo la relazione:

$$Q_{ext,3} = Q_{ext,4} \cdot \left(\frac{E_{r,3}^2}{E_{r,4}^2} \right)_{on\ coupler} \quad (3.1)$$

e ricavare dai rapporti R/Q , calcolati dai programmi, il valore $R_{sh} = Q_{ext} \cdot R/Q$. Nel caso a tre celle abbiamo trovato per il modo TM^{111} , che nelle quattro celle dava i maggiori problemi di accoppiamento, un r/q pari a $51\Omega/m$ invece di $30\Omega/m$ e un E_r di $0.15MV/m$ invece di $0.27MV/m$ che indicava un aumento della impedenza shunt di circa un fattore 5.5. Attribuendo questo alto valore di r/q al fatto che tale modo ha esattamente la frequenza doppia del modo fondamentale e la bassa intensità del campo nella posizione dell'accoppiatore ad un insufficiente diametro della cavità terminale adiacente al BT, abbiamo cominciato a lavorare su questi due parametri. Aprendo i BT fino ad un raggio di 13.320 cm abbiamo trovato un comportamento migliore per tutti i modi.

4. Dimensioni principali delle cavità a tre e quattro celle.

La tabella (1) presenta le dimensioni della cavità a tre celle a confronto di quelle della quattro celle.

	3 cells	4 cells
int. cell radius	37.505 cm.	37.645 cm.
ext. cell radius	37.534 cm.	37.645 cm.
iris radius	10.839 cm.	12.052 cm.
1 st beam tube radius	13.320 cm.	14.320 cm.
1 st cut - off freq.	659 Mhz	609 Mhz
2 nd beam tube radius	9.925 cm.	9.925 cm.
2 nd cut - off freq.	885 Mhz	885 Mhz
beam tube lenght	22.262 cm.	36.155 cm.
active lenght	125.448 cm.	168.73 cm.
waste lenght percentage	25%	33%

Nella cavità a quattro celle il diametro della cella terminale e delle celle interne è lo stesso. Nella cavità a tre celle invece la cella centrale ha un diametro più piccolo di quella esterna (fig.5). La percentuale di lunghezza perduta, cioè la quantità $(1 - L_{act}/L_{tot}) \times 100$ è ridotta dal 33% per la quattro celle al 25% per la tre celle, avendo ridotto la lunghezza dei BT da $\lambda/2$ a $\lambda/4$ a spese di un più alto campo H_θ sul piano della *flangia* (elemento di giunzione tra cavità distinte a tenuta di ultra alto vuoto). Questo problema verrà trattato in seguito.

5. Confronto tra i parametri del modo fondamentale TM_π^{010} .

Nella tabella (2) sono messi a confronto i parametri principali del modo fondamentale.

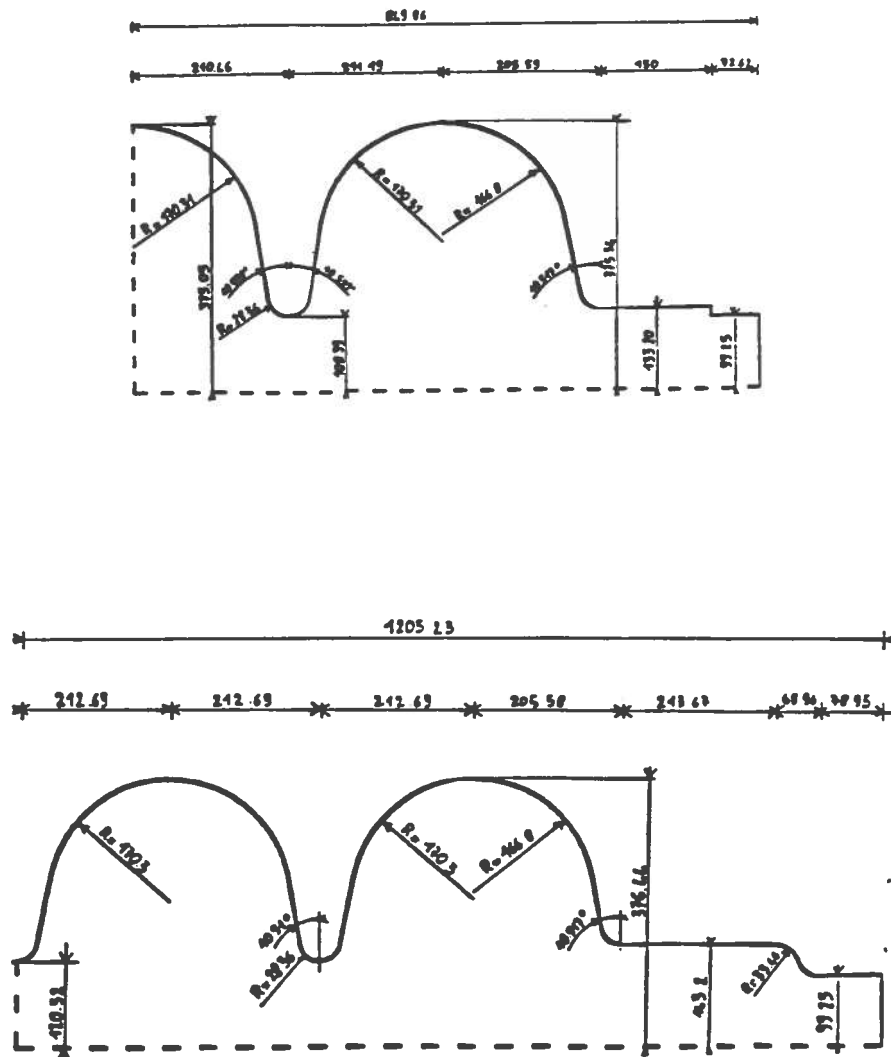


Fig.5: Dimensioni delle cavità a tre e a quattro celle

Table 2: Parameters for fundamental TM_{π}^{010} mode

	3 cell	4 cell
frequency	352.025 Mhz	353.200 Mhz
R/Q for act.length	302 Ω/m	278 Ω/m
accelerating field (•)	0.73 MV/m	0.6 MV/m
E_{peak}/E_{acc}	2.29	2.37
H_{peak}/E_{acc}	30 Oe/(MV/m)	32 Oe/(MV/m)
E_z field unflatness	none	1.5%
coupling factor	1.3%	1.77%
$F_{\pi} - F_{nearest\ one}$	1.195 Mhz	0.93 Mhz
tolerances (#)	29.6%	34%

Nella cavità a tre celle abbiamo riscontrato i seguenti miglioramenti:

- 1) E_{acc} è aumentato del 19%
- 2) r/q è aumentato del 8.3%
- 3) E_{peak}/E_{acc} è diminuito del 3.5%
- 4) H_{peak}/E_{acc} è diminuito del 6%

(*) E_{acc} è calcolato per un Joule di energia immagazzinata nella cavità.

(#) È riportata in percentuale la variazione di E_{max} in celle distinte.

6. Confronto tra i parametri dei modi TM_0^{011} e TM_{π}^{012}

Nella tabella (3) sono riportati i parametri dei due modi superiori più dannosi per la stabilità del fascio.

Abbiamo introdotto la *figura di merito* $(r/q)/E_r^2$ utile per il confronto perchè permette di calcolare le R_{sh} della cavità a tre celle disponendo del corrispondente valore della cavità a quattro celle, supponendo di usare lo stesso accoppiatore.

La relazione tra le R_{sh} è:

$$R_{sh,3} = R_{sh,4} \cdot (r/q)_3 / (r/q)_4 \cdot (E_{r,4}^2 / E_{r,3}^2) \quad (6.1)$$

in cui i campi sono stati normalizzati ad un Joule di energia totale immagazzinata. Confrontando i valori di $(r/q)/E_r^2$ per il modo TM^{012} si osserva un buon miglioramento nella possibilità di accoppiare questo modo.

Table 3: Parameters for TM^{011}_0 and TM^{012}_π modes

TM^{011}_0 mode	3 cells	4 cells
frequency	637.7 Mhz	640.4 Mhz
R/Q for act.lenght	83.6 Ω/m	65 Ω/m
E_r field on coupler (*)	0.16 MV/m	0.16 MV/m
$(R/Q)/E_r^2$	3266 (Ω/m)/(MV/m) ²	2539 (Ω/m)/(MV/m) ²
TM^{012}_π mode	3 cells	4 cells
frequency	1024.8 Mhz	1007.7 Mhz
R/Q for act.lenght	28 Ω/m	15.2 Ω/m
E_r field on coupler (*)	0.71 MV/m	0.34 MV/m
$(R/Q)/E_r^2$	55.5 (Ω/m)/(MV/m) ²	131.5(Ω/m)/(MV/m) ²

(*) E_r field on coupler è il campo sulla superficie del BT calcolato a 8 cm dalla fine della cella per un Joule di energia immagazzinata.

7. Modi dipolari.

L'analisi dei modi dipolari è stata fatta con il programma URMEL, sfruttando la possibilità di adattare la griglia al disegno della cavità (fig.6), in modo tale che l'errore commesso nella discretizzazione del contorno della cavità fosse minore di 0.5 cm.

Nelle tabelle (4) e (5) riportiamo l'elenco completo dei modi dipolari a frequenza inferiore a 1 Ghz, usando le seguenti dimensioni ed abbreviazioni:

- *Freq.* indica la frequenza del modo in *Mhz*.
- r/q è in Ω/m .
- E_r è il campo calcolato sulla superficie dei BT per un Joule di energia immagazzinata.
- $\eta \equiv (r/q)/E_r^2$ è la *figura di merito* espressa in $(\Omega/m)/(MV/m)^2$.
- *Zero* indica la posizione degli zeri del campo E_r in cm dalla fine della cella terminale, se sono vicini alla posizione dell'accoppiatore.

I modi dipolari più pericolosi sono quelli che hanno frequenza inferiore alla frequenza di *cut-off* del BT più stretto (885 Mhz) e uno zero del campo E_r vicino alla posizione dell'accoppiatore. Osservando la tabella si può notare che nel caso della cavità a tre celle c'è solo un modo con tali caratteristiche, mentre nella cavità a quattro celle nove. D'altra parte alcuni valori di r/q sono più alti nella cavità a

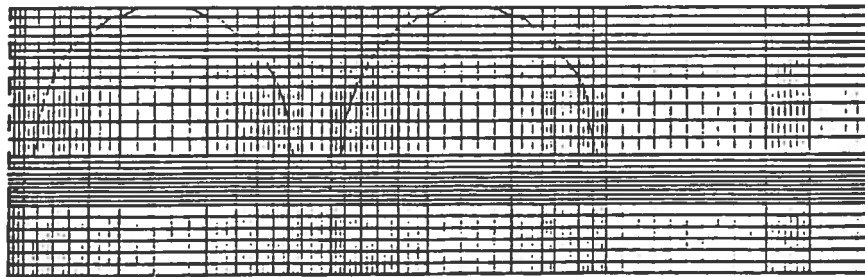
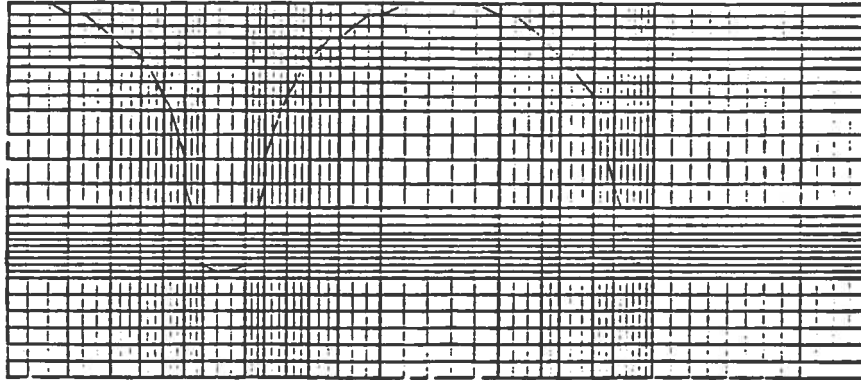


Fig.6: Griglie prodotte dal programma URMEL.

Table 4: 3 cells parameters for dipole modes.

Freq.	R/Q	E_r	η	zero
461.252	0.07	0.31		no
467.740	7.92	0.44	41	no
481.427	9.39	0.38	65	no
505.253	11.01	0.33	101	no
513.334	17.07	0.28	218	no
519.229	4.45	0.14		no
699.366	28.36	1.53	12	no
699.663	0.9	1.7		no
701.230	48.6	0.71	96	no
703.140	19.38	0.95	21.5	no
703.434	0.8	1.43		no
705.975	0.29	1.54		no
712.346	0.38	0.71		no
713.596	0.8	0.96		no
764.507	1.71	0.82		no
766.387	1.2	0.8		no
797.128	1.71	1.06		no
801.138	0.7	0.31		no
816.395	1.65	0.61		no
817.889	1.96	0.5		no
832.913	0.16	0.1		no
832.941	0.21	0.07		no
837.971	0.45	0.5		no
838.993	1	0.06	307	6
857.981	3	1.61		no
864.010	2.51	1.45		no
890.005	0.	1.2		no
890.248	0.19	1.8		no
893.045	0.9	0.11		no
894.235	0.9	0.72		no
898.386	2.2	0.04	1564	7.5
899.884	0.	0.13		7
903.253	0.37	1.34		no
912.785	0.2	1.8		no
964.997	0.	0.3		9
984.560	0.	0.8		no
994.727	0.89	0.85		11.25
1024.84	0.7	0.65		3.5

Table 5: 4 cells parameters for dipole modes.

Freq.	R/Q	E_T	η	zero
446.880	0.18	0.25		no
453.529	1.19	0.42		no
463.429	10	0.47	45.3	no
477.833	8.66	0.4	54	no
498.019	2.34	0.36		no
507.074	14.28	0.33	131	no
514.251	9.67	0.23	182.8	no
517.916	0.96	0.11		no
666.845	1.33	2.07		no
666.879	0.	2.06		no
668.322	1.46	2.06		no
668.358	0.	2.1		no
687.969	5.18	0.09	717	no
691.583	0.25	0.28		no
691.762	29.14	0.27	400	no
754.190	0.70	0.47		no
768.422	0.11	0.85		no
780.706	2.19	0.83		no
786.507	2.42	0.99		no
797.779	0.14	0.53		4.7
804.231	0.	0.78		no
816.347	1.64	0.21		6.5
823.343	1.17	0.66		4.5
819.614	1.91	0.12		6.7
823.938	1.67	0.57		no
829.686	0.	0.009		4.5
829.689	0.	0.024		no
831.621	0.77	0.021		9.7
831.665	0.87	0.037	619	5.2
835.663	0.65	0.035		9.1
836.165	0.56	0.13		5.6
893.111	0.27	0.23		no
893.482	0.31	0.16		no
893.487	0.47	0.006	14466	8.4
893.610	0.45	0.024	801	10.5
896.999	0.92	0.49		no
897.460	0.	0.17		no
898.012	0.68	0.19		11.3
912.189	2.80	1.42		no
917.694	0.1	1.51		no
938.318	1.	0.68		no
954.090	0.93	1.05		12.5
960.197	0.1	0.81		no
982.168	0.1	1.16		no
991.914	0.	0.63		6
1010.55	0.42	1.05		no

tre celle e questo potrebbe comportare un effetto dannoso nell'interazione con il fascio.

8. Considerazioni sulle perdite di potenza.

Nella cavità a tre celle, la minor lunghezza dei BT produce un campo H_θ più alto agli estremi della struttura e questo aumenta le perdite per il modo fondamentale. Ad esempio se chiudiamo la struttura con un piatto di rame ed eseguiamo una misura, troviamo con un campo accelerante di 5 MV/m che le perdite su tale piatto aumentano da 24 mW per le quattro celle, a 1.36 W per le tre celle. Una valutazione della degradazione del Q_{tot} è possibile tenendo conto del fatto che le perdite di potenza all'interno delle celle sono: circa 50 W per la quattro celle e 35 W per la tre celle, con un campo di 5 MV/m e un Q pari a $3 \cdot 10^9$. Tuttavia tale incremento nelle perdite di potenza è ancora accettabile per avere buone prestazioni della cavità. Con questo campo accelerante il valore di H_θ sulla superficie al termine del BT è circa 2 Oe per la quattro celle e 1.4 Oe per la tre celle.

9. Cavità in Rame e cavità in Niobio.

Si è parlato di potenza dissipata e di perdite; cerchiamo ora di capire da cosa dipendano per poterle minimizzare.

Le perdite sono dovute alla *resistenza superficiale* R_s del materiale di cui è costituita la cavità ed aumentano all'aumentare della frequenza. Una valutazione approssimativa delle perdite può essere fatta a partire dal valore della corrente che scorre sulla superficie di un conduttore ideale in presenza di un campo elettromagnetico. Dalla legge di Joule si ha:

$$P_d = \frac{1}{2} \int_s R_s \cdot H_s^2 da \quad (9.1)$$

dove s indica la superficie della cavità, quindi per abbassare le perdite a parità di campo è necessario ridurre R_s .

Una possibilità consiste nel ricorrere ai materiali superconduttori ed impiegare cavità operanti a temperature inferiori della temperatura critica T_c del materiale adottato. Il materiale comunemente adottato è il Niobio (Nb).

Fissata la frequenza a 350 Mhz e la temperatura a 4.2° K i valori di R_s per il Rame e per il Niobio sono rispettivamente:

$$R_{s,Cu} = 4.9 \cdot 10^{-3} \Omega$$

$$R_{s,Nb} = 3.5 \cdot 10^{-8} \Omega$$

ed il rapporto:

$$\frac{R_{s,Cu}}{R_{s,Nb}} \div \frac{Q_{Nb}}{Q_{Cu}} = 1.4 \cdot 10^5$$

Al CERN sono state sviluppate cavità in Rame e cavità in Niobio con valori dei fattori di qualità pari a:

$$Q_{Cu} = 4 \cdot 10^4$$

$$Q_{Nb} = 3 \cdot 10^9$$

Poichè nel Niobio la R_s è molto piccola, il valore di Q_{Nb} dipende molto dal valore del campo accelerante considerato (in questo caso $E_{acc} = 5 \text{ MV/m}$) che, come vedremo, genera termini di perdita aggiuntivi.

Confrontiamo le potenze dissipate per ottenere un campo accelerante di 1.5 MV/m in una cavità in Niobio a temperatura di 4.2° K ed in una cavità in rame a temperatura ambiente. Nel primo caso si ha $P_d = 1.4 \text{ W/m}$ dissipati alla temperatura di 4.2° K ; bisogna quindi tenere conto anche della potenza

spesa per far funzionare il sistema di refrigerazione. L'efficienza del criostato a tale temperatura è pari a $1/330$. Perciò si avrà $P_d = 1.4 \cdot 330 W/m = 470 W/m$. Nella cavità in Rame si ha invece: $P_d = 54 KW/m$. Il risparmio in termini di potenza dissipata a temperatura ambiente è perciò circa un fattore 100 a favore della cavità superconduttrice.

Si potrebbe allora pensare che, a parità di potenza dissipata, sia possibile ottenere campi 10 volte superiori nelle cavità in Niobio. Purtroppo questo non è possibile per ragioni di carattere tecnologico. Infatti nelle cavità multicelle non è possibile salire in media oltre i $5 MV/m$, poichè ad alti campi acceleranti diventano importanti degli effetti che aumentano le perdite e possono deteriorare temporaneamente lo stato di superconduttività. Tali fenomeni sono principalmente di due tipi:

- instabilità termiche dovute a *difetti superficiali*
- emissione di campo prodotte da sorgenti puntiformi o *non resonant electron loading*

Per *difetto superficiale* si intende una regione, in generale microscopica in cui il Nb non conserva le caratteristiche di omogeneità e purezza. Queste regioni si comportano come zone ad alte perdite che vengono riscaldate dal campo RF. Se il riscaldamento è tale da innalzare la temperatura della regione circostante al difetto oltre la $T_c = 9.2^{\circ}K$ del Niobio, il materiale cessa di essere superconduttivo, l'energia immagazzinata nella cavità viene dissipata in un tempo molto breve ed il campo crolla (Quench). Un modo per ridurre questo effetto, innalzandone la soglia, consiste nell'impiegare Niobio molto puro che abbia una buona conducibilità termica verso il bagno di Elio refrigerante [8]. Buoni risultati in questo senso si ottengono con le cavità in Rame, con conducibilità termica lineare $\lambda_{Cu} = 460 W/mK$, ricoperte di Niobio ($\lambda_{Nb} = 50 W/mK$), in cui il corpo di Rame massiccio consente di ottenere ottime conducibilità termiche dello strato di Niobio verso il bagno di Elio. In ogni caso la lavorazione del materiale gioca un ruolo essenziale.

Ai valori di campo accelerante di $5 MV/m$ corrispondono valori massimi del campo elettrico superficiale superiori a $10 MV/m$. Con questi valori del campo si ha emissione di elettroni dalla superficie di Nb che vengono accelerati a spese del campo elettromagnetico e costituiscono un termine di perdita aggiuntiva. Anche in questo caso è possibile alzare la soglia di comparsa di questo fenomeno, *electron loading*, con opportuni trattamenti tecnologici della superficie di Nb interna alle cavità. Ad esempio pulendo accuratamente con solventi e sciacquando in acqua corrente demineralizzata. Oppure ricorrendo allo *Helium processing* che consiste nell'immettere gas He nella cavità fino a pressioni di circa $10^{-5} mbar$ e nell'applicare potenza RF alla cavità in modo tale da ottenere emissione di elettroni. Laddove si ha emissione di elettroni si ottiene una ionizzazione locale del gas He, con formazione di ioni He^+ , che risalgono le traiettorie degli elettroni fino al centro emettitore, bombardandolo e provocandone molto spesso la scomparsa.

Da quanto detto emerge l'importanza delle tecnologie dei materiali e del trattamento delle superfici, al fine di ottenere campi più alti nelle cavità superconduttrici, fino al limite teorico in cui il campo magnetico H_c raggiunge il valore che genera una transizione allo stato di normale conduzione. Nel caso delle cavità in Niobio della geometria scelta al CERN, tale valore corrisponde a campi acceleranti pari circa a $50 MV/m$.

Bibliografia

- [1] H.Piel, CERN-87-03, pag. 736
- [2] G.Cavallari, E.Chiaveri, E.Haebel, P.Legendre, W.Weingarten, CERN-EF-3726h/EH/ed
- [3] E.Haebel, P.Marchand, J.Tuckmantel, CERN-EF-RF/84 (1984)
- [4] K.Halbach, R.F.Holsinger, *Part. Acc.*, 7, (1976), 213
- [5] T.Weiland, *Part. Acc.*, 15, (1984), 245
- [6] E.Haebel, J.Tuckmantel, CERN-EF-RF/81-5, (1981)
- [7] P.M.Lapostolle, A.L.Septier, *Linear Accelerators*, (North Holland, Amsterdam, 1957)
- [8] C.Benvenuti, D.Bloess, E.Chiaveri, N.Hilleret, M.Minestrini, W.Weingarten, CERN-LEP-VA/87-64 (1987)