

COMITATO NAZIONALE PER L'ENERGIA NUCLEARE  
Laboratori Nazionali di Frascati

LNF-76/18(R)  
11 Marzo 1976

U. Bizzarri, G. Branca, A. Gandini, M. Maccioni, F. Morselli  
e A. Vignati: VULCANO: UNA SORGENTE DI FASCI INTENSI  
PULSATI DI ELETTRONI RELATIVISTICI. -

U. Bizzarri, G. Branca, A. Gandini, M. Maccioni, F. Morselli e  
A. Vignati: VULCANO: UNA SORGENTE DI FASCI INTENSI PUL  
SATI DI ELETTRONI RELATIVISTICI(\*) .-

1. -INTRODUZIONE. -

Negli ultimi anni sono state sviluppate nei principali labora  
tori di ricerca del mondo macchine acceleratrici capaci di produrre  
fasci pulsati di elettroni di energie comprese nell'intervallo 0,1 -15  
MeV, intensità che possono raggiungere valori dell'ordine di  $10^6$  A  
e durata dell'ordine di  $10^{-8} \div 10^{-6}$  sec<sup>(1+5)</sup>.

Lo sviluppo di tali macchine è motivato dalla necessità di  
disporre di "electron-beams" di forte intensità per scopi applica  
tivi e di ricerca in molteplici campi, quali ad esempio:

- riscaldamento e confinamento di plasmi con densità di  $10^{12} + 10^{16}$   
particelle/cm<sup>3</sup>(6);
- riscaldamento di bersagli solidi di deuterio<sup>(7+9)</sup>;
- eccitazione di laser a gas (es. N<sub>2</sub>, HF etc.)<sup>(10+13)</sup>;
- controllo di innesco e preionizzazione nei laser a CO<sub>2</sub><sup>(14+16)</sup>;
- generazione di microonde nel campo centrimetrico con potenze di  
picco dell'ordine di GW<sup>(17, 18)</sup>.

---

(\*) - Hanno collaborato alla realizzazione della macchina: Il Servizio  
Officina, il Sig. M. Spina e i Sigg. G. Marini, G. Mattogno, O.  
Paoletti, S. Petrosino, P. Rivelli, S. Travaglini e V. Venturini.

2.

- accelerazione collettiva di ioni; con queste macchine infatti si creano campi acceleranti dell'ordine del MeV/cm, estendentisi per circa 5-10 cm, permettendo di ottenere fasci di ioni accelerati con energie di 5 MeV/nucleone e intensità fino a  $10^{15}$  ioni per impulso<sup>(19+24)</sup>;
- produzione di intensi "flash" di raggi X per ricerche sugli effetti di forti dosi di radiazioni sui materiali<sup>(25+28)</sup>.

La generazione e la propagazione di un fascio intenso di elettroni relativistici presenta inoltre effetti interessanti dal punto di vista fisico non completamente chiariti dalla teoria elettromagnetica, quali la stessa accelerazione collettiva, la formazione di una corrente netta, la neutralizzazione della carica spaziale, il "pinch", fenomeni di coerenza, ecc... Oltre la forte intensità del fascio elettronico prodotto, queste macchine hanno come caratteristica comune la piccola dispersione in energia associata al fascio medesimo e l'elevato rendimento energetico.

Gli impulsi di corrente vengono ottenuti per estrazione a freddo da un catodo, opportunamente costruito, affacciato ad una lamina o ad un sistema di lamine metalliche in funzione di anodo. Il campo elettrico necessario per estrarre gli elettroni e fornire loro l'energia richiesta, è ottenuto applicando a questo diodo un impulso di tensione formato da una linea di ritardo a bassa impedenza. L'ampiezza e la durata degli impulsi sono predeterminati in funzione delle caratteristiche energetiche del fascio elettronico. A sua volta la linea formatrice viene caricata trasferendole l'energia immagazzinata in un elevatore di tensione.

Gli scopi per i quali vengono normalmente impiegate queste macchine non richiedono una periodicità degli impulsi di corrente; laddove risulti necessario, una tale caratteristica può essere ottenuta risolvendo alcuni problemi costruttivi del diodo, connessi in particolare alla meccanica dell'anodo, che deve peraltro offrire la massima trasparenza agli elettroni. In ogni caso il limite superiore alla frequenza di ripetizione viene imposto anche dall'intervallo di tempo necessario ad accumulare l'energia nel sistema.

Da un punto di vista operativo questi generatori di intensi "electron beams" sono caratterizzati da una relativa semplicità di funzionamento; essi non richiedono infatti un gran numero di operatori, né grossi e costosi impianti di controllo, mentre i costi di esercizio e manutenzione rimangono sensibilmente contenuti anche rispetto ad altri tipi di macchine che potrebbero risultare concorrenti in determinate applicazioni.

Esse per le loro particolari caratteristiche risultano di grande

interesse in alcune attività del CNEN e soprattutto nel campo della fusione termonucleare controllata; gli "electron beams" infatti possono essere impiegati con successo per il riscaldamento di bersagli solidi (in particolare di pasticche costituite da deuterio-tritio o altri nuclei leggeri) e per la preionizzazione di laser di potenza, i cui fasci vengono impiegati per il riscaldamento e confinamento di plasmi.

I laser di potenza preionizzati con "electron-beams" potrebbero trovare vasto impiego anche nella messa a punto di processi di separazione isotopica.

Per una illustrazione più approfondita di queste applicazioni, che esula dallo scopo della presente nota, si rimanda ai programmi di attività attualmente in corso o in fase di elaborazione.

In vista di queste possibili applicazioni è stata interamente progettato e realizzato presso il Laboratorio Sincrotrone dei LNF del CNEN un generatore di fasci intensi di elettroni relativistici denominato "VULCANO".

Nei paragrafi seguenti sono illustrati gli aspetti costruttivi e le caratteristiche di questa macchina.

## 2. - IL VULCANO. -

Il Vulcano (Fig. 1) è sostanzialmente costituito da un elevatore di tensione di tipo "Marx" nel quale viene accumulata l'energia da trasferire ad un sistema formatore che è ottenuto da una doppia linea coassiale connessa a Blumlein. L'impulso di tensione da questa formato, viene quindi applicato a un diodo ad emissione di campo, che fornisce il fascio di elettroni le cui caratteristiche principali sono le seguenti:

Energia massima	500 KeV
Corrente massima	100 KA
Durata dell'impulso	60 ns.
Tempo di salita	<10 ns.

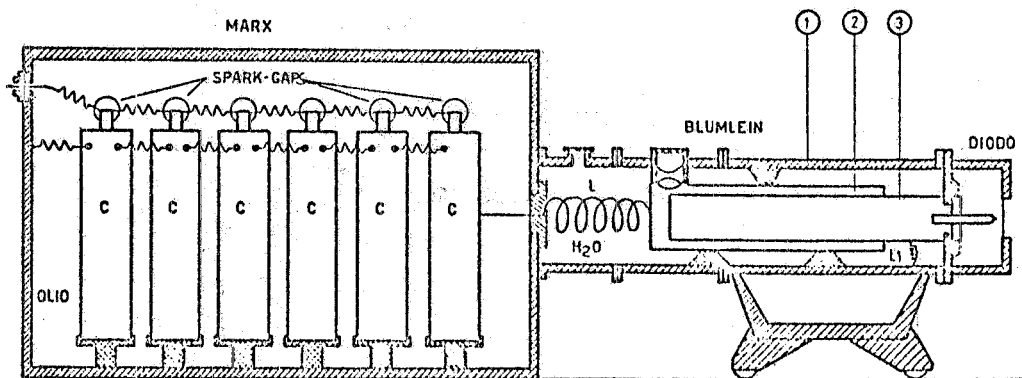


FIG. 1

4.

### 2.1. - Il Marx. -

Poichè il formatore impiega come dielettrico l'acqua deionizzata, che presenta una costante di tempo ( $\rho \cdot E$ ) dell'ordine di  $200 \mu s$ , esso non può essere caricato con un generatore in corrente continua; è necessario quindi ricorrere ad un generatore pulsato.

Fra i possibili dispositivi di questo tipo la scelta è ricaduta sul generatore di Marx<sup>(29)</sup> per la relativa semplicità di funzionamento e per la possibilità di immagazzinare la necessaria energia (5.4 KJ) in un piccolo volume.

Esso infatti impiega un banco di condensatori che vengono caricati in parallelo e scaricati in serie mediante un sistema di interruttori a "spark-gap" che si chiudono contemporaneamente in seguito ad un opportuno comando ("trigger").

Nel nostro caso vengono impiegate due colonne, ciascuna di 6 condensatori da  $1 \mu F$ , caricati alla tensione di +30 e -30 KV rispettivamente e disposti secondo lo schema di Fig. 2.

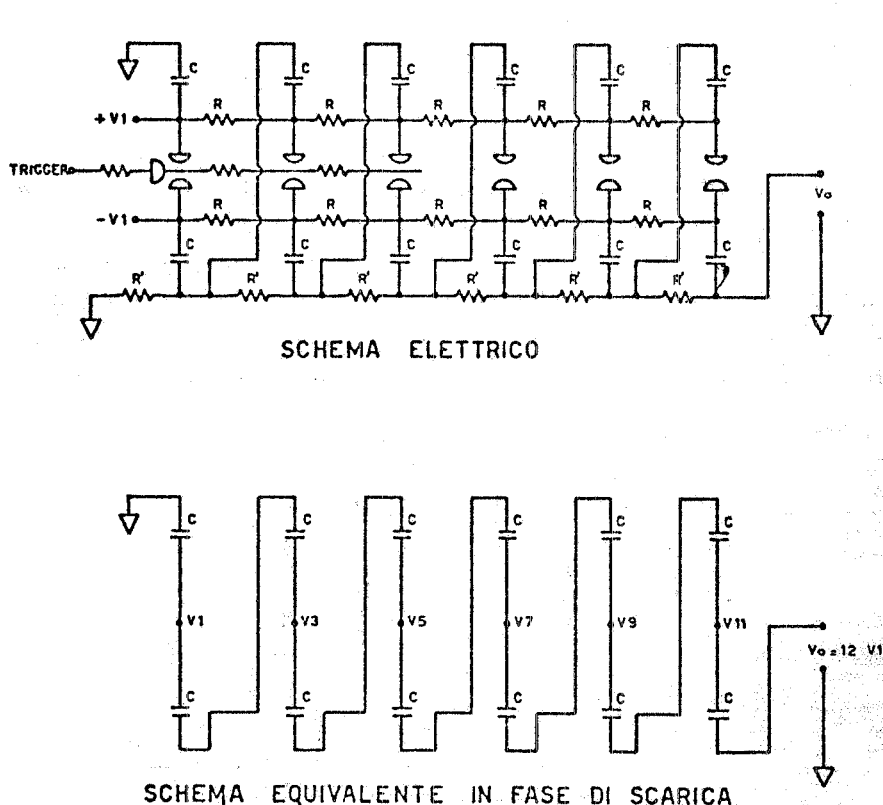


FIG. 2 - Il Marx.

I condensatori di capacità  $C$  vengono caricati alla tensione voluta  $V_1$  attraverso le resistenze  $R$ ; all'atto della chiusura delle "spark-gap" i condensatori carichi alla tensione  $V_1$  si dispongono in serie e la tensione di picco nominale  $V_0$  ai capi del Marx dovrebbe risultare  $V_0 = 12 V_1 = 360 \text{ KV}$ .

In realtà la tensione effettiva risulta inferiore a quella nominale a causa delle perdite di carica dovute alla capacità parassita  $C_p$  di ciascuno stadio RC verso massa; la tensione finale infatti risponde alla relazione:

$$(2.1) \quad V_0 = nV_1 \frac{C/C_p + 1}{C/C_p + n}$$

$$n = \text{numero degli stadi; nel nostro caso} = 12$$

$$C_p \approx 400 \text{ pF}$$

Lo scostamento dal valore nominale è nel nostro caso molto piccolo ed è sensibilmente contenuto entro i limiti dell'errore introdotto nella misura di  $V_0$  ( $\sim 10\%$ ), a causa dell'elevato rapporto  $C/C_p$  e del relativamente piccolo valore di  $n$ .

Le "spark-gap" sono state dimensionate e realizzate in modo da rispondere principalmente ai seguenti requisiti:

- impossibilità di formazione di scariche superficiali sul dielettrico;
- riproducibilità della chiusura ad una determinata tensione;
- risposta pronta al comando di chiusura: il sistema delle spark-gap infatti risponde ad un unico comando e l'inevitabile ritardo di intervento tra l'una e l'altra deve essere contenuto in limiti tali da evitare la formazione di una gradinata nell'impulso di tensione che si crea ai capi del Marx. In funzione di questi requisiti le spark-gap (Fig. 3) sono state realizzate utilizzando come dielettrico il perspex in forma di cilindri cavi, sulle cui basi sono montati gli elettrodi. Al centro, tra gli elettrodi affacciati, è montato un terzo elettrodo, che ha la funzione di comandare la chiusura dello interruttore.

Il dispositivo è montato in modo da offrire la massima garanzia di tenuta; l'interno infatti viene riempito di azoto ad una pressione variabile fino a 5 atm. con il duplice scopo di regolare meglio la chiusura ad una determinata tensione e di renderla più rapida.

Tutto il Marx infine è chiuso in un contenitore metallico riempito di olio ad alta rigidità dielettrica ( $\sim 100 \text{ KV/cm}$ ), onde evitare ulteriormente scariche spurie tra le diverse parti del sistema.

6.

## 2.2. - La Blumlein. -

Il dispositivo utilizzato per ottenere un impulso di tensione rettangolare di ampiezza e durata volute è costituito da un sistema di due linee di trasmissione coassiali, uguali per impedenza caratteristica e ritardo, connesse a Blumlein (Fig. 4)<sup>(30)</sup>.

In questo modo si ha il vantaggio di disporre, a parità di durata, di un impulso di tensione di ampiezza pari alla tensione di carica di ciascuna linea, su un carico pari al doppio dell'impedenza caratteristica delle singole linee.

Il formatore quindi è realizzato mediante tre cilindri coassiali in acciaio inox (Fig. 1), in cui il cilindro interno e quello intermedio costituiscono la prima linea, mentre il cilindro intermedio e quello esterno costituiscono la seconda linea.

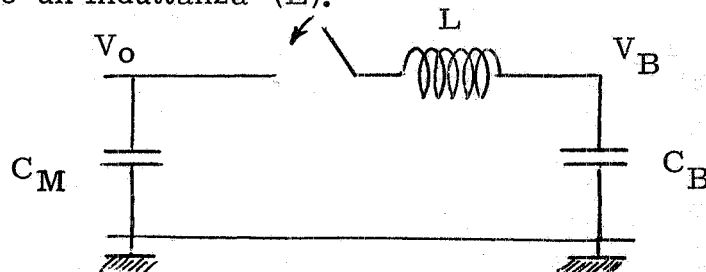
I dati costruttivi e le caratteristiche elettriche della linea sono riportati nella Tabella I.

Il dielettrico è costituito da acqua deionizzata, che per la sua costante dielettrica ( $\epsilon_r \approx 80$ ) e la sua rigidità ( $> 200$  KV/cm), è stata preferita ad altri dielettrici, come ad esempio olio o gas compressi; rispetto a questi ultimi infatti essa permette, sia l'immagazzinamento di una maggiore quantità di energia a parità di volume, sia la riduzione della lunghezza della blumlein, per ottenere la voluta durata dell'impulso di tensione (60 ns.).

Tali vantaggi compensano abbondantemente la necessità di utilizzare un circuito di deionizzazione.

La Blumlein è racchiusa agli estremi da flange in perspex di spessore e sagoma opportuni; attraverso la prima è connessa al diodo, che è sotto vuoto, mentre attraverso la seconda è connessa al Marx.

L'accoppiamento tra il Marx e la Blumlein viene realizzato attraverso un'induttanza (L).



In tal modo la carica della blumlein avviene in maniera risonante, per cui la sua tensione di picco  $V_B$  è dato dal massimo valore assunto dalla relazione approssimata

$$(2.2) \quad V_B = \frac{\alpha}{1 + \alpha} V_0 (1 - \cos \omega t),$$

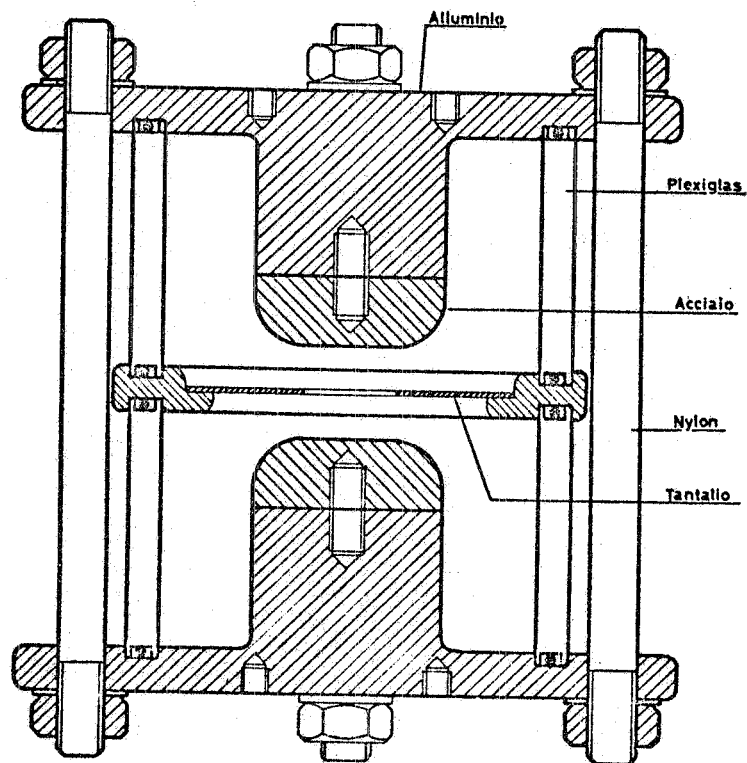


FIG. 3 - Spark-Gap del Marx.

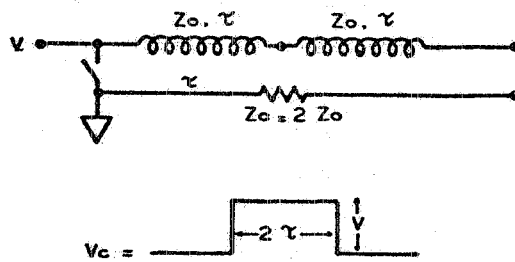


FIG. 4 - Linea Formatrice tipo Blumlein.

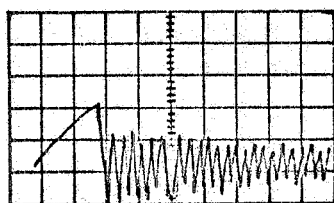


TABELLA I

Caratteristiche della Blumlein di Vulcano

Diometri degli elettrodi	$R_1 = 235 \text{ mm}$	$R_2 = 341 \text{ mm}$	$R_3 = 345 \text{ mm}$	$R_4 = 500 \text{ mm}$
	$R_4/R_3 = R_2/R_1 = 1,45$	$\ln(b/a) = \ln 1,45$	$= 0,372$	
Impedenza della linea	$Z = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln(b/a)$	$Z = 2,5 \text{ ohm}$	$Z_{\text{blum}} = 5 \text{ ohm}$	
Capacità della linea	$C = \frac{2\pi\epsilon}{\ln(b/a)} 1 \cdot 2$	$C \approx 24000 \text{ PF}$		
Durata dell'impulso	$\tau = \frac{2l}{c} \sqrt{\epsilon_r} = \frac{2 \cdot 1}{3 \cdot 10^8} \sqrt{80} \approx 60 \text{ ns}$			
Campo elettrico sugli elettrodi (per una ddp di 550 KV)	$E = \frac{V}{a \ln(b/a)}$	$E_1 = 128 \text{ KV/cm}$	$E_2 = 88 \text{ KV/cm}$	$E_3 = 60 \text{ KV/cm}$
Corrente impulsiva su carico adattato	$i_p = V/Z_{\text{blum}} = \frac{550}{5} = 110 \text{ KA}$			
Rigidità dell'acqua deionizzata	$F_{\pm} = \frac{0,3}{t} \frac{1}{3 \text{ A}} \text{ MV/cm}$	$F_{-} = \frac{0,6}{t} \frac{1}{3 \text{ A}} \text{ MV/cm}$	$F_{+} = \frac{0,6}{t} \frac{1}{3 \text{ A}} \text{ MV/cm}$	$A \text{ in cm}^2$ $t \text{ in } \mu\text{s}$
Campi max ammissibili sugli elettrodi	$E_1 = 246 \text{ KV/cm}$	$E_2 = 119 \text{ KV/cm}$	$E_3 = 119 \text{ KV/cm}$	$E_4 = 230 \text{ KV/cm}$

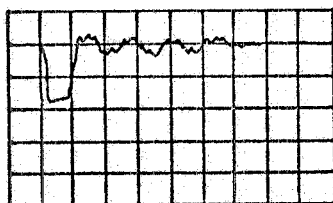
dove  $\alpha = C_M/C_B$  (essendo  $C_M = C/12$  la capacità dei Marx), che nel nostro caso è di 550 KV essendo  $\alpha = 4$ . L'andamento temporale della tensione della Blumlein è riportato nella Fig. 5.



245 KV/cm.  
0.5  $\mu$ s/cm.

A

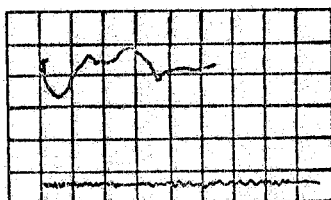
Tensione di carica della B.L. letta su "Partitore a tazza" (vedi par. 3.1.1.)



270 KV/cm.  
100 ns/cm.

B

Andamento temporale dell'impulso di tensione (B) e di corrente (C) generato nella B.L. chiusa sul diodo di cui al par. 2.3.



75 KA/cm.  
100 ns/cm.

C

FIG. 5

L'induttanza  $L(7,5 \mu\text{H})$  ha anche il compito di interporre, ai tempi brevi, un'alta impedenza tra la Blumlein e il Marx.

Durante la fase di carica la d.d.p.  $V_B$  è applicata tra l'elettrodo intermedio e quello esterno del formatore, mentre la d.d.p. ( $V_D$ ) ai capi del diodo è mantenuta nulla per effetto di una induttanza  $L_1$  che ai tempi lunghi cortocircuita l'elettrodo esterno con quello centrale.

Quando la tensione  $V_B$  raggiunge un valore intorno al 90% del valore massimo, si chiude la spark-gap. Da questo istante un impulso di tensione di ampiezza  $V_D = V_B$  e durata di 60 ns si manifesta ai capi

10.

del diodo (in questa fase infatti l'induttanza  $L_1$  assume una elevata impedenza), dando luogo all'emissione degli elettroni per effetto del campo applicato al catodo.

Anche la spark-gap deve rispondere ai requisiti richiesti a quelle del Marx, tenendo presente inoltre che deve sostenere una tensione ( $V_B$ ) di gran lunga maggiore e deve presentare un'induttanza sufficientemente bassa per non introdurre un intollerabile tempo di salita nell'impulso di tensione.

Sono state provate delle spark-gap in acqua autocomandate; pur rispondendo in maniera accettabile dal punto di vista circuitale, esse presentano però l'inconveniente di deformarsi per effetto delle sollecitazioni dovute alle scariche.

Più soddisfacente è risultata la spark-gap ad azoto pressurizzato attualmente usata (Fig. 6). In essa la pressione dell'azoto viene regolata in modo che si chiuda quando la tensione di carica della linea ha raggiunto l'80 - 90% del suo valore massimo. Ciò impone però un certo sacrificio di energia a beneficio della riproducibilità.

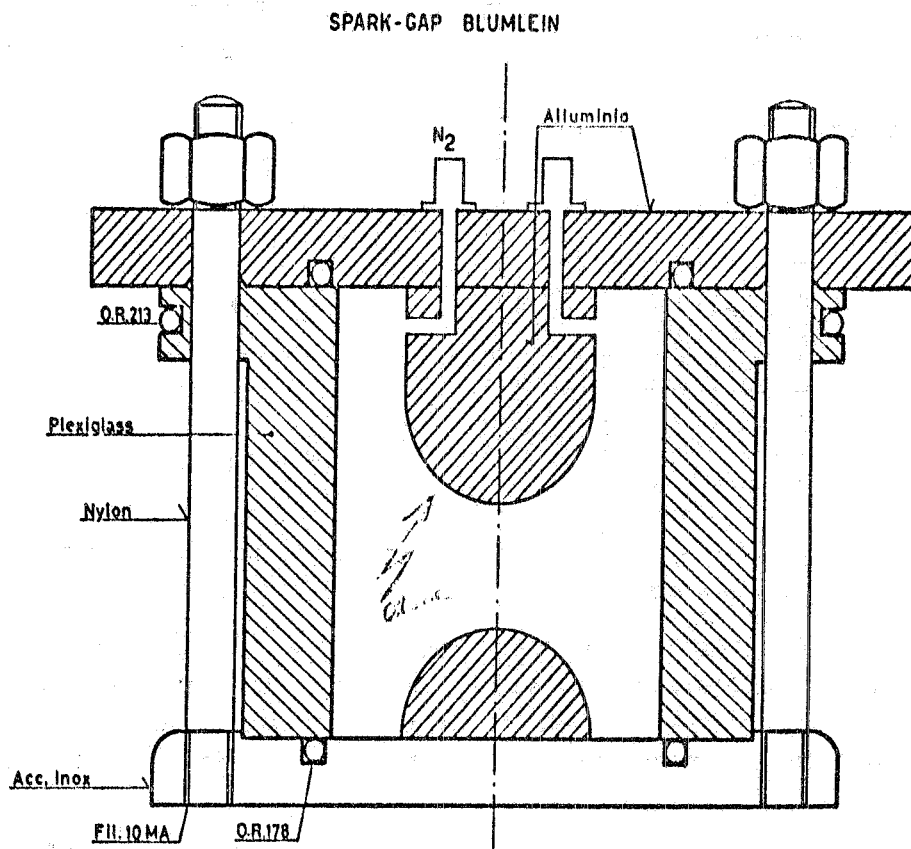


FIG. 6

### 2.3. - Il diodo. -

La parte finale del Vulcano, la parte cioè in cui viene prodotto il fascio di elettroni è un diodo ad emissione di campo a geometria piana (Fig. 7).

Il catodo, collegato all'elettrodo centrale della Blumlein è costituito nella sua parte estrema da un cilindro di alluminio, del diametro di 45 mm; affacciato ad esso, ad una distanza dello ordine di qualche millimetro è disposto l'anodo che è costituito da una lamina sottile (acciaio inox o mylar alluminato), trasparente agli elettroni. Tutto il sistema è racchiuso in una camera sotto vuoto.

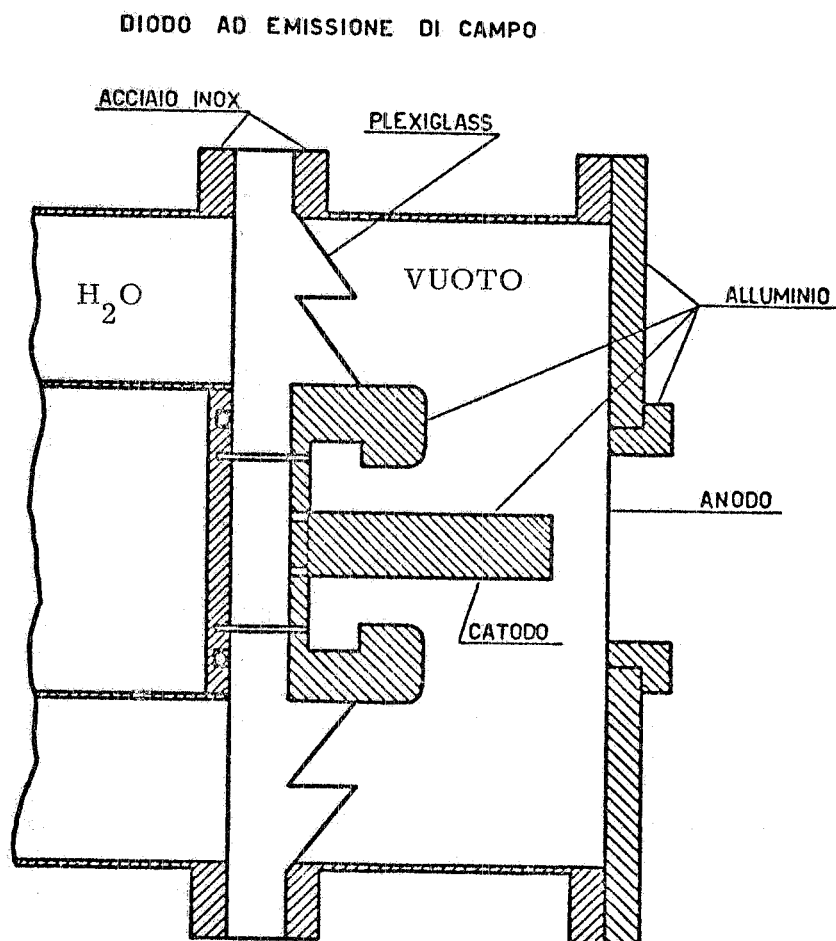


FIG. 7

Un sistema agevole di sostituzione della lamina (Fig. 8) si è reso necessario poichè ad ogni impulso si ha la vaporizzazione dell'anodo a causa dell'elevato valore della densità di corrente emessa dal catodo.

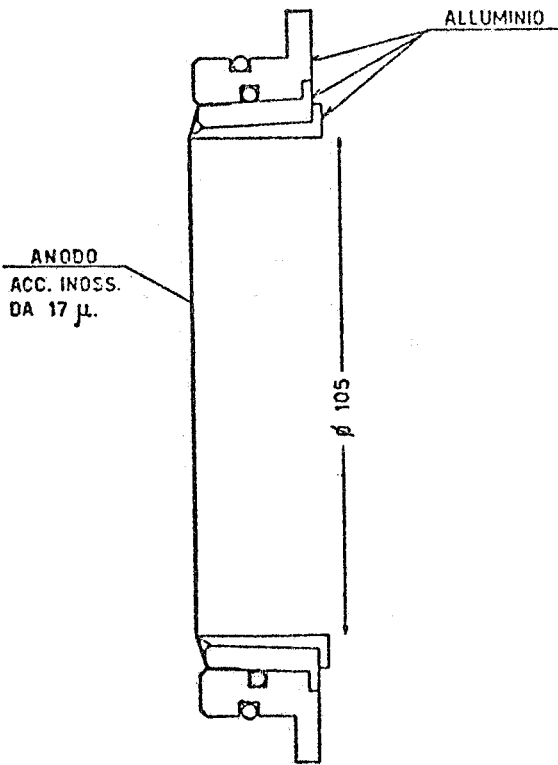


FIG. 8 - Portalamina.

Da quanto detto è possibile che in fase di carica della linea (che avviene come già detto in maniera impulsiva) una frazione della tensione  $V_B$  si presenti per effetto capacitivo ai capi del diodo (impulso anticipato o "prepulse"). In tal caso si viene a creare prematuramente un plasma catodico con conseguente cortocircuito del diodo prima dello arrivo dell'impulso di tensione voluto.

L'inconveniente si ovvia prolungando l'elettrodo interno (3) (vedi Fig. 1) in modo che tra questo e l'elettrodo (1) si formi una capacità ( $C_{13}$ ), che assume un carattere concentrato rispetto al tempo di carica della linea, con il compito di cortocircuitare il "prepulse".

Il fenomeno si riduce ancora interrompendo la continuità metallica del cilindro che costituisce il catodo; dividendolo in due parti e interponendo tra di esse un disco in materiale isolante ("prepulse switch"). Questo si comporta come un elemento in serie al partitore capacitivo costituito da  $C_{23}$  e dalla capacità catodo-anodo ( $C_{CA}$ ) e ha la funzione di ridurre l'ampiezza dell'impulso anticipato ad un valore al di sotto della soglia di emissione per effetto di campo. Un tale accorgimento

Gli elettroni vengono emessi per emissione di campo solo nella prima fase dello impulso, durante la quale si ha l'esplosione e la vaporizzazione delle micropunte della superficie del catodo con conseguente formazione del plasma catodico.

Nella fase successiva gli elettroni vengono emessi da questo plasma. Quasi contemporaneamente, per effetto del riscaldamento della lamina, si forma un plasma anodico che si muove in senso inverso a quello catodico con una velocità relativa dell'ordine di 2-4 cm/  $\mu$ s.

Nell'istante in cui i due plasmi si incontrano l'impedenza del diodo si annulla bruscamente. Fino a questo istante i due plasmi si comportano come elettrodi virtuali.

ha inoltre l'effetto di migliorare il tempo di salita dell'impulso di corrente emesso dal catodo. Infatti la tensione acceleratrice effettiva si manifesta sulla superficie del catodo soltanto quando assume un valore molto al di sopra della soglia di emissione per effetto di campo. In questo modo l'emissione di elettroni avviene in prossimità della zona piatta dell'impulso di tensione con un andamento temporale indipendente da quello di  $V_D$  e dai parametri circuitali del sistema Blumlein - diodo.

La condizione di massimo trasferimento dell'energia al fascio elettronico coincide con l'adattamento dell'impedenza dinamica del diodo ( $Z_D$ ) a quella della Blumlein, che è nel nostro caso di  $5 \Omega$ .

Dato il tipo di dispositivo e la natura dei fenomeni che accompagnano l'emissione è difficile trovare una relazione esatta che esprima l'impedenza  $Z_D$ . Tuttavia nell'ipotesi di corrente in regime di carica spaziale, è possibile esprimere l'impedenza del diodo secondo la relazione proposta da Child e Langmuir.

$$(2.3) \quad Z_D(\text{ohm}) = K (V_D)/V_D^{1/2} \cdot (d - vt)^2 \cdot R^2 \quad (V_D \text{ in MeV})$$

dove:

$V_D$  = differenza di potenziale ai capi del diodo

$R$  = raggio del catodo in centimetri

$d$  = distanza tra catodo e anodo in centimetri

$K(V)$  = funzione crescente di  $V$  che assume per elettroni non relativistici il valore 136

$v$  = velocità di diffusione dei plasmi anodico e catodico

In questa relazione non si tiene conto del campo magnetico associato alla corrente.

La (2.3) è in buon accordo con le misure effettuate per valori della corrente critica di Lawson.

$$(2.4) \quad I_C(\text{amp}) = 8500 (\gamma - 1)^{1/2} R/d$$

dove  $\gamma$  è il fattore relativistico degli elettroni.

La (2.4) rappresenta il valore della corrente per cui, per effetto del campo magnetico associato, gli elettroni percorrono una traiettoria curva che li porta a sfiorare tangenzialmente l'anodo.

Per valori della corrente al di sopra di  $I_C$  il comportamento del diodo può essere spiegato dalla teoria del parapoteniale proposta da De Packh. Secondo tale teoria, la corrente emessa da un diodo a geometria piana è data dalla relazione

14.

$$(2.5) \quad I_{pp} = 8500 \gamma_o \ln \left[ \gamma + (\gamma^2 - 1)^{1/2} \right] R/d$$

L'impedenza del diodo può essere ricavata dal diagramma di Fig. 9 che rappresenta  $I_{pp}/R/d$  in funzione di  $V_D$ .

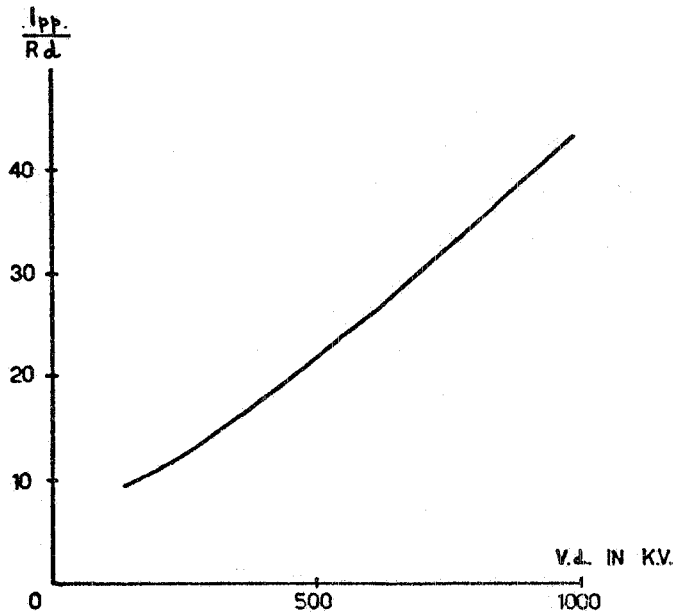


FIG. 9 - Diagramma  $I_{pp}/R/d$  in funzione di  $V_D$ .

#### 2.4. - Il tubo di "drift". -

Per studiare le caratteristiche del fascio è stato connesso al diodo un tubo metallico lungo circa 80 cm, con un diametro interno di 22 cm (Fig. 10). Un estremo è separato dal diodo per mezzo dello anodo, mentre l'altro estremo è chiuso da una flangia o da dispositivi di diagnostica del fascio.

Questo elemento, denominato tubo di propagazione o di "drift", può essere considerato l'utilizzatore o il mezzo attraverso il quale il "beam" elettronico si propaga prima di essere utilizzato. In esso può essere praticato il vuoto o può essere contenuto un gas a pressione diversa a seconda delle condizioni sperimentali. In quest'ultimo caso la lamina anodica viene sollecitata meccanicamente dalla differenza di pressione tra il diodo e il tubo di "drift", deformandosi e quindi modificando la geometria del diodo. L'inconveniente è stato ovviato nel modo rappresentato in Fig. 11 e cioè con un sistema di due lamine (doppia lamina); quella indicata con A, che assume il ruolo di

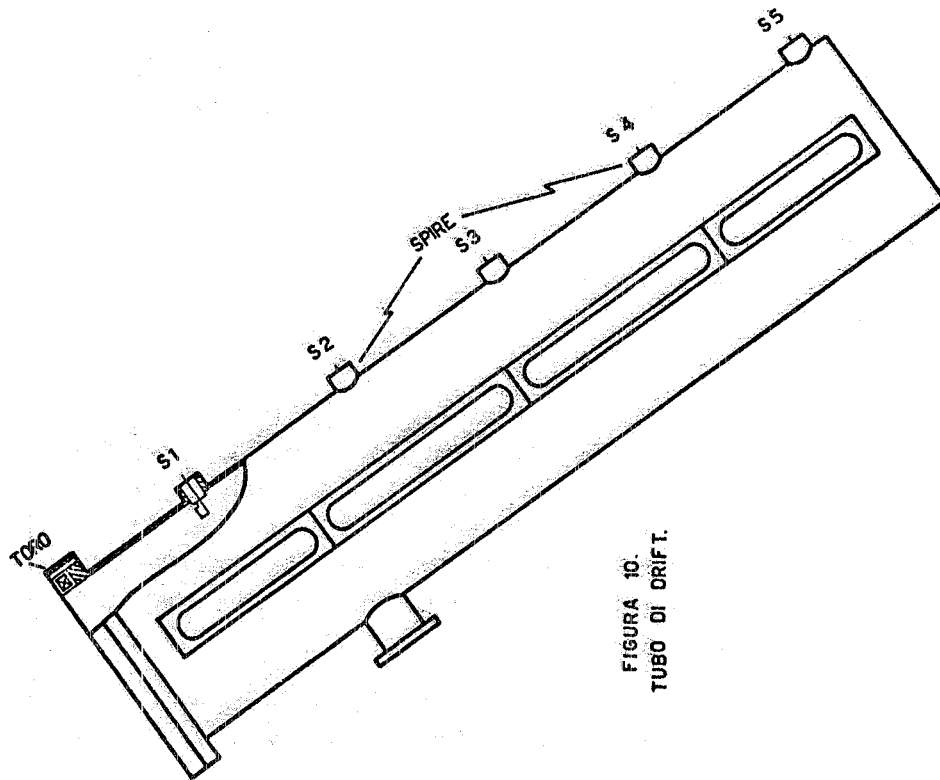


FIGURA 10.  
TUBO DI DRIFT.

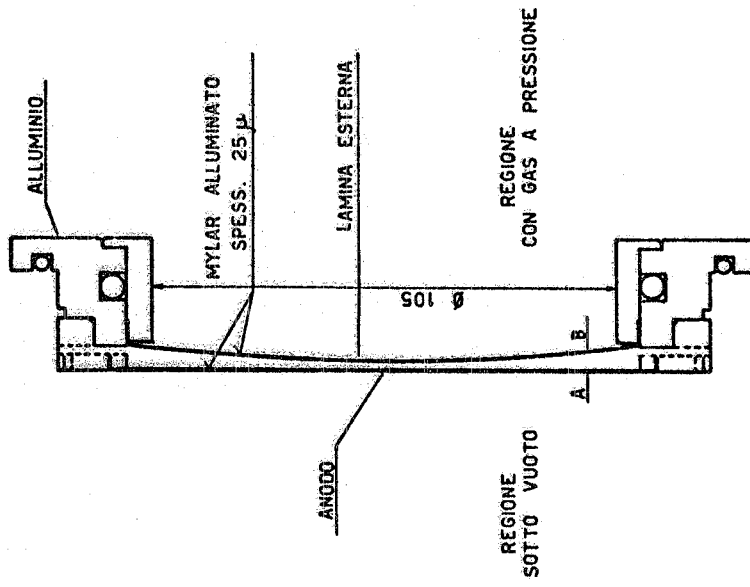


FIG. 11 - Doppia lamina.



anodo effettivo, essendo immersa nel vuoto, non è soggetta a differenze di pressione e può quindi mantenere la forma piana; la lamina B ha invece il compito di sostenere la differenza di pressione ed è disposta in modo da non appoggiarsi alla prima, anche al massimo della deformazione.

Lungo il tubo, a intervalli regolari, sono disposte cinque sonde induttive ( $S_1$ ) per mezzo di passanti a tenuta, con lo scopo di trasmettere informazioni sulla propagazione del fascio (Fig. 10).

Gli studi finora effettuati sui fasci intensi di elettroni porta alla conclusione che il loro comportamento dipende notevolmente da vari parametri; quali ad esempio, la stessa intensità del fascio, l'energia degli elettroni, la pressione del gas attraverso il quale si propaga e la natura stessa del gas.

Dalla Fig. 12 si vede, ad esempio, la dipendenza della corrente netta (corrente emessa dal catodo - la corrente neutralizzata) dalla pressione del gas contenuto nel tubo di drift. Intorno a questo dispositivo è quindi necessario disporre di una diagnostica sempre più ricca e sofisticata.

### 3. - DIAGNOSTICA. -

Come detto in precedenza, la macchina Vulcano funziona a impulsi singoli, ciascuno dei quali va quindi considerato come un'esperienza a se, da cui occorre ottenere il massimo delle informazioni, sia sul comportamento del fascio, sia sui parametri della macchina, tra i quali principalmente occorre tenere sotto controllo i seguenti:

- tensione di carica della Blumlein  $V_B$ ;
- tensione ai capi del diodo  $V_D$ ;
- corrente massima emessa dal diodo  $I_F$ ;
- corrente netta nel tubo di "drift"  $I_N$ ;
- corrente di elettroni nel tubo di "drift"  $I_E$ .

A questo scopo sono state messe a punto alcune tecniche riguardanti principalmente misure di alte tensioni impulsive e forti correnti impulsive con tempi di salita dell'ordine di  $10^{-9}$  s. Sono state pure messe a punto o sono in fase di studio tecniche di misura di altro tipo, per esempio calorimetriche o fotografiche, riguardanti le caratteristiche energetiche del fascio o altre grandezze che via via si renda necessario conoscere e misurare.

Va tenuto presente che, date le forti dosi di radiazioni che si generano in concomitanza con l'emissione del diodo, il Vulcano

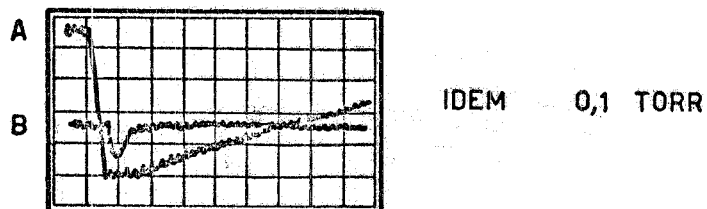
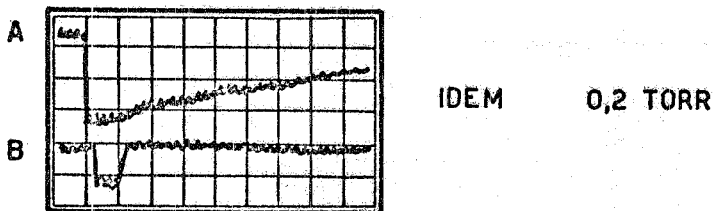
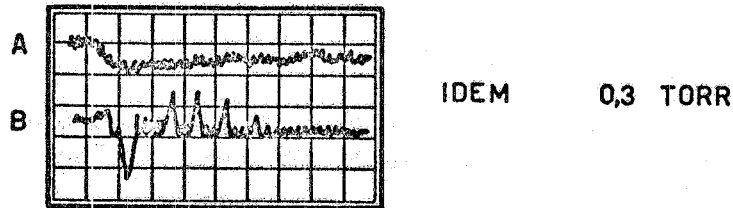
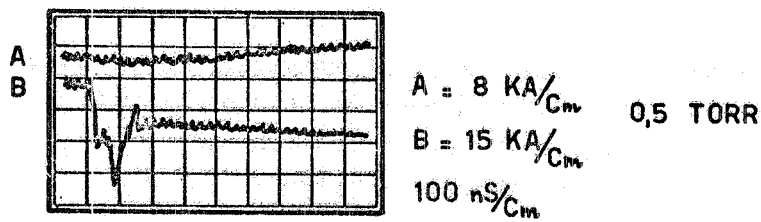


FIG. 12 - A - corrente netta misurata dopo la lamina. B - corrente di elettroni misurata alla fine del tubo di drift.

è racchiuso in un "bunker" costituito da blocchi in calcestruzzo, reso inaccessibile durante il funzionamento. Ciò pone dei problemi di trasferimento delle informazioni agli apparati di misura, che si risolvono in parte con un più efficiente schermaggio dei cavi di trasmissione e con l'uso di una gabbia di Faraday per contenere gli apparecchi.

### 3.1. - Misure di tensione. -

Le misure di tensione vengono eseguite mediante una combinazione in serie di partitori capacitivi e resistivi.

I primi vengono realizzati in modo da ottenere l'attenuazione

dei segnali fino a valori di tensione applicabili ai comuni componenti elettronici; essi infatti per le loro caratteristiche, quali: rigidità dielettrica, dissipabilità in energia, coefficienti di tensione, sono inutilizzabili oltre il centinaio o al massimo il migliaio di Volt.

Appunto con questi ultimi componenti vengono eseguite le successive ripartizioni, la trasmissione e gli adattamenti agli strumenti di misura.

### 3.1.1. - Tensione di carica della Blumlein. -

La tensione di carica della Blumlein  $V_B$  viene eseguita mediante un partitore capacitivo (Fig. 13) alloggiato nella Blumlein stessa.

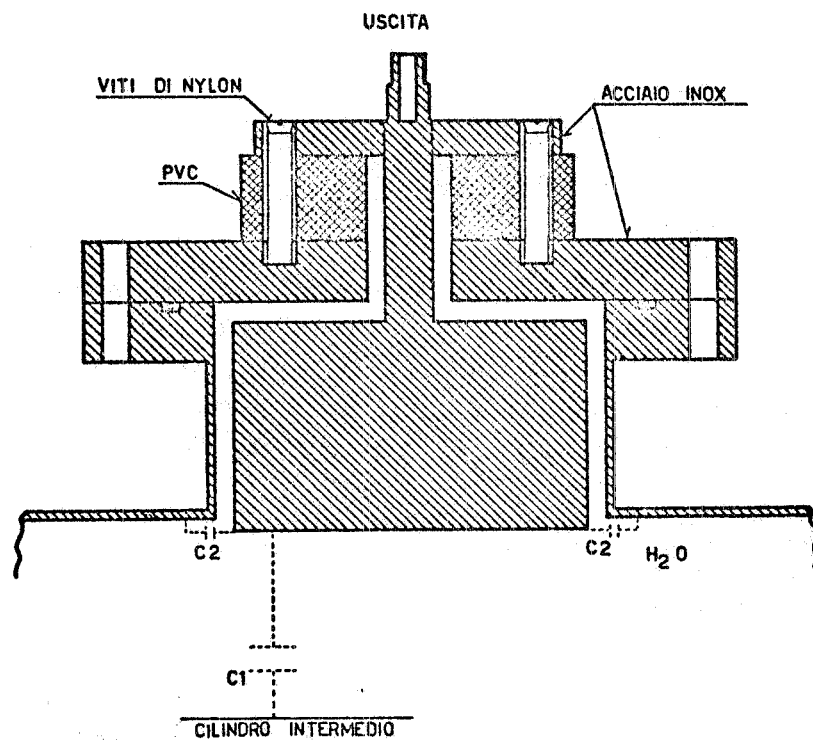


FIG. 13 - Partitore a tazza.

E' costituito da un elettrodo immerso nell'acqua, dal quale, attraverso una resistenza di alcuni  $K\Omega$  si preleva un segnale pressochè proporzionale al rapporto tra le capacità  $C_2$  (relativa al sistema elettrodo-cilindro esterno) e  $C_1$  (relativa al sistema elettrodo-cilindro intermedio).

La struttura cilindrica (a tazza) è stata realizzata per ottenere il massimo valore di capacità del condensatore  $C_2$ , affinché il coefficiente di attenuazione risulti sufficientemente elevato.

I valori calcolati di  $C_2$  e  $C_1$  sono rispettivamente 5800 pF e 36 pF per cui il coefficiente di attenuazione risulta  $A_C = C_2/C_1 = 160$ .

Data l'uniformità del dielettrico, che è la stessa acqua deionizzata della Blumlein, il partitore risulta automaticamente compensato, essendo il prodotto  $RC = Q\varepsilon$  per qualunque geometria.

La successiva ripartizione avviene tra la resistenza di collegamento  $R_t$  (3,6 K  $\Omega$ ), montata in una struttura coassiale, e l'impedenza caratteristica del cavo di trasmissione ( $Z_0 = 50 \Omega$ ).

L'attenuazione calcolata di quest'ultimo risulta quindi

$$A_R = R_t/Z_0 = 72$$

Il valore misurato dell'attenuazione totale è  $A_T = A_R \cdot A_C = 12350$

In Fig. 5A è riprodotto l'andamento della tensione di carica della blumlein vista all'oscilloscopio.

### 3.1.2. - Tensione del diodo. -

Anche la tensione ai capi del diodo viene misurata mediante un partitore capacitivo, cui è connesso in serie un attenuatore resistivo.

Poichè all'interno della camera del diodo è già contenuto un elemento per la misura della corrente, si è preferito alloggiare il partitore all'interno della Blumlein, vicino alla flangia che la separa dal diodo stesso. Ciò non solo per evitare elementi perturbativi della geometria del diodo, ma anche perchè le dimensioni e la struttura della camera rendono più complicata la realizzazione di un dispositivo con un sufficiente fattore di attenuazione.

Il partitore (Fig. 14) è costituito da un anello di acciaio inox, che avvolge coassialmente l'elettrodo interno della Blumlein, connesso a sua volta al catodo, rispetto al quale realizza la capacità  $C_1$ . La superficie esterna dell'anello realizza con l'involucro esterno (massa) la capacità  $C_2$ . Il fattore di attenuazione calcolato risulta  $A_C = C_2/C_1 = 64$ .

La successiva attenuazione si ottiene mediante il partitore resistivo costituito da una resistenza  $R_d$  (3,6 K), connessa all'anello, in serie all'impedenza caratteristica  $Z_0$  (50  $\Omega$ ) del cavo di trasmissione che porta il segnale agli apparati di misura. Il suo fattore di ripartizione è  $A_R = R_d/Z_0 = 72$ .

L'attenuazione misurata all'altro estremo del cavo adattato è pari a 6000.

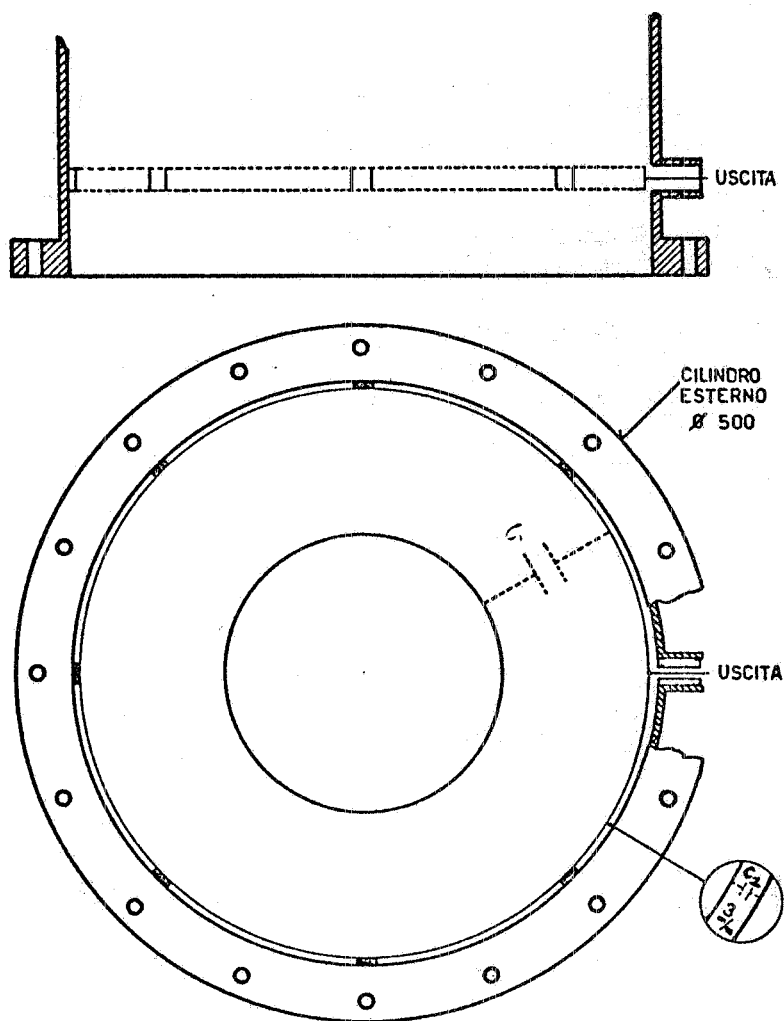


FIG. 14 - Partitore ad anello.

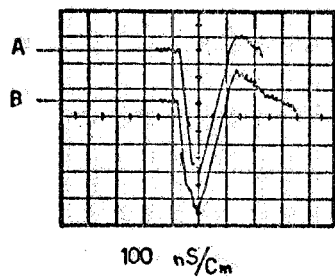
In Fig. 5B è riportato l'andamento della tensione sul diodo visto all'oscilloscopio.

Anche in questo caso il partitore capacitivo sfrutta le caratteristiche dielettriche dell'acqua deionizzata.

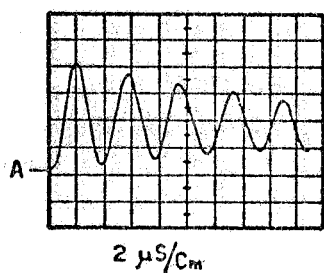
Tutti i partitori sono stati tarati con impulsi di tensione calibrati in ampiezza dell'ordine di  $10 \pm 20$  KV, ottenuti sostanzialmente scaricando un condensatore d'alta tensione.

Nella Fig. 15 sono riportate le fotografie relative alla taratura dei partitori.

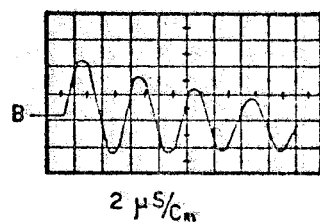
L'uso di alte tensioni per la taratura dei partitori è stato decisivo per ottenere riproducibilità. Si era infatti notato che le tarature effettuate a bassa tensione ( $100 \pm 200$  Volt) non erano assolutamente riproducibili. Tale comportamento è probabilmente attribuibile alla non linearità delle caratteristiche elettriche dell'acqua e al comportamento del contatto acqua-metallo.



ANELLO  
 A = TENSIONE SUL CATODO 1100 V/Cm  
 B = USCITA PARTITORE 0,2 V/Cm  
 ATTEN. 6000



TAZZA  
 A = TENSIONE CARICA BLUMLEIN  
 5 KV/Cm



B = USCITA PARTITORE 0,5 V/Cm  
 ATTEN. 12.350

FIG. 15 - Tarature dei partitori per misure di tensione.

### 3.2. - Misure di corrente. -

Per le misure di corrente sono stati usati dei trasformatori, il cui primario è costituito dal fascio elettronico stesso, mentre il secondario è un avvolgimento toroidale chiuso su carico resistivo (Fig. 16).

Un sistema di questo tipo fornisce una risposta proporzionale alla corrente primaria con un tempo di risposta sufficientemente piccolo; esso è regolato dall'equazione seguente:

$$(3.1) \quad M \frac{dI_T}{dt} + L \frac{dI_F}{dt} + R_R I_F = 0$$

dove

M = coefficiente di mutua induzione;

$L$  = induttanza dell'avvolgimento del secondario;  
 $R_T$  = resistenza di carico secondario;  
 $I_F$  = la corrente del primario (il fascio elettronico)  
 $I_T$  = la corrente del secondario;

Risolvendo l'equazione (avendo trascurato il termine  $R_T \cdot I_F$  rispetto a  $L/R_T$  ai tempi brevi) risulta omettendo la serie di passaggi,  $I_F = I/N$  ( $N$  = il numero delle spire avvolte sul toro).

Poichè  $I_T$  può essere espressa mediante la d.d.p.  $V_T$ , che si manifesta su  $R_T$  per effetto della corrente  $I_T$  e cioè  $I_T = V_T/R_T$  avremo in definitiva  $I_F = V_T/N \cdot R_T$  che permette di conoscere la corrente in funzione della tensione misurata sulla resistenza  $R_T$ .

La realizzazione del dispositivo richiede l'adozione di accorgimenti che evitino o riducano le cause di distorsioni nella risposta, quali ad esempio, gli accoppiamenti magnetici spuri, gli accoppiamenti elettrostatici, il prevalere di elementi circuitali parassiti, le sue dimensioni e la sua dislocazione.

La messa a punto di ciascun dispositivo infine comporta una calibrazione che viene espressa in  $V/KA$ .

Anche per le misure di corrente sono stati approntati dei banchi di taratura in cui si riproducono in parte le stesse condizioni sperimentali. Nella Fig. 17 viene riportata come esempio la foto relativa alla taratura del toro  $T_D$ .

### 3.2.1. - Corrente emessa dal catodo. -

La corrente  $I_F$  emessa dal catodo viene misurata mediante un trasformatore a toro ( $T_D$ ) supportato da un anello in perspex a sezione quadrata.

Dati i forti campi elettrici che si creano nella camera del diodo, il toro viene contenuto in un involucro schermante anch'esso ad anello, connesso a massa lungo tutta la sua superficie esterna. Sullo schermo è praticata una fessura anulare di spessore 1 mm, per permettere lo accoppiamento magnetico con la corrente primaria  $I_F$ . Il segnale viene prelevato con un breve cavo schermato collegato ad un connettore coassiale, montato sull'involucro esterno del diodo. Il dispositivo fornisce una risposta di  $1.25 \cdot V/KA$ .

In Fig.5C è riportato l'andamento di  $I_F$  visto all'oscilloscopio.

### 3.2.2. - Misura della corrente netta. -

La corrente netta  $I_N$  viene misurata in due punti diversi del tubo di "drift". Il primo è situato subito dopo l'anodo, dove è posto un trasformatore toroidale  $T_N$ , con sensibilità di  $0.7 V/KA$ .

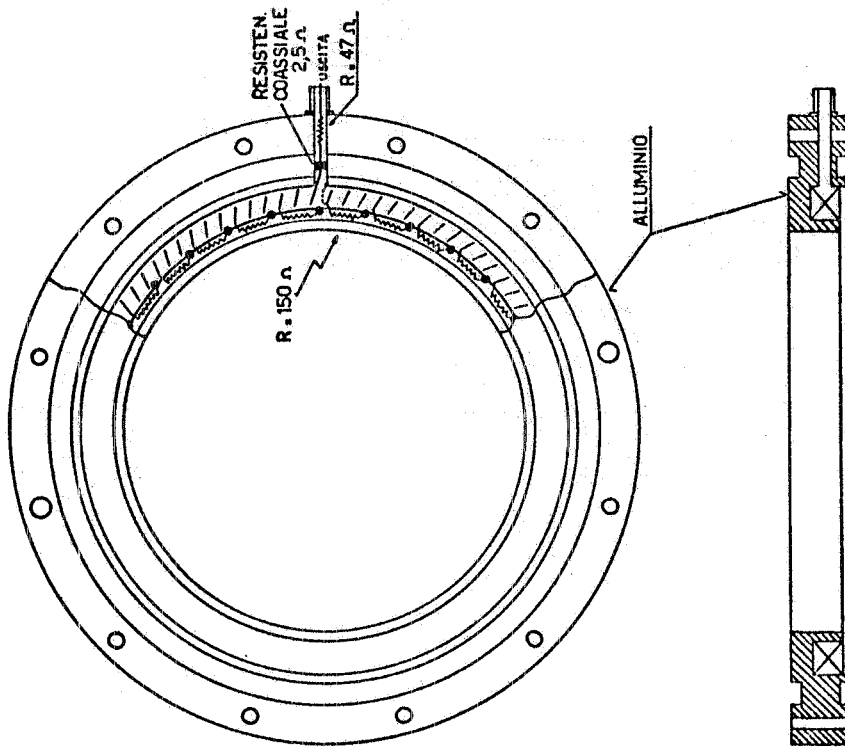
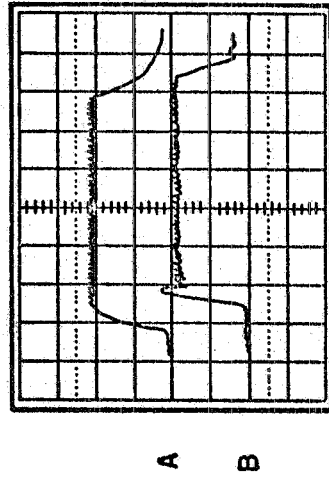


FIG. 16 - Toro per misurare la corrente del fascio di elettroni.



A = CORRENTE PRIMARIA. 20 A/C<sub>m</sub>

B = USCITA TORO. 50 mV/C<sub>m</sub>

TARATURA = 1,25 V/KA

FIG. 17 - Taratura del toro di misura della corrente emessa dal diodo.



La corrente di elettroni  $I_E$  dopo che il fascio ha attraversato il tubo di "drift", viene misurata raccogliendo gli elettroni su un cilindro di grafite. E' stato scelto questo materiale per il suo alto punto di fusione e per la scarsa attitudine a generare elettroni secondari. Per eliminare la corrente di ioni l'elettrodo di grafite è tenuto sotto vuoto. Una lamina di mylar alluminato, viene utilizzata per permettere il passaggio degli elettroni, bloccando contemporaneamente la corrente di ioni.

La corrente di elettroni viene misurata mediante un trasformatore di corrente disposto coassialmente con il cilindro di grafite (Figura 18).

In Fig. 12 sono riportati l'andamento di  $I_N$  e  $I_E$  al variare della pressione nel tubo di drift.

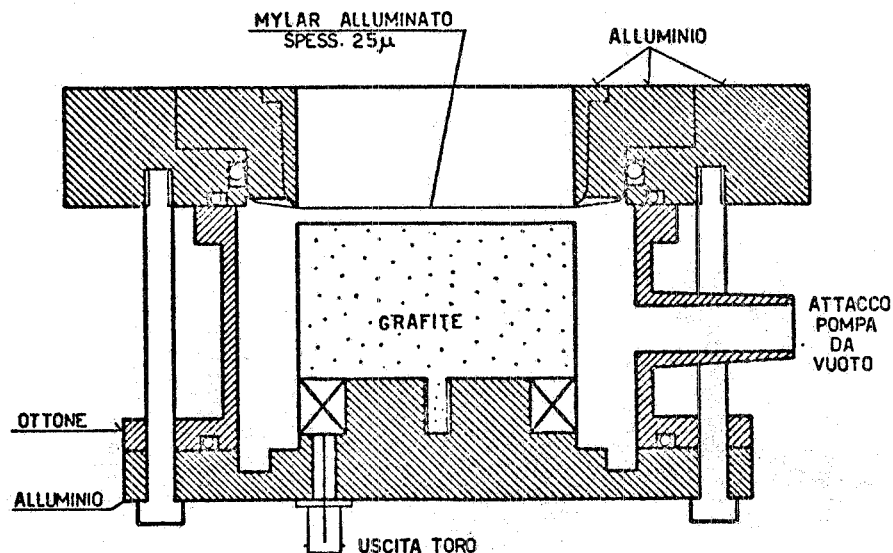


FIG. 18 - Pozzo di Faraday.

## REFERENCES. -

- (1) - "Aurora Facility" Army Research and Development News Magazine, (March 1972).
- (2) - J. D. Shipman Jr., The Electrical Design of the NRL Gamble II Pulse Generator, IEEE Trans. Nucl. Science NS18, 453 (1971).
- (3) - T. H. Martin et al., Summary of the Hermes Flash X Ray Program, Sandia Lab. Research Report SC-RR-69-421 (1969).
- (4) - S. G. Graybill and S. V. Nablo, The Generation and Diagnosis of Pulsed Relativistic Electron Beams Above  $10^{10}$  Watts, IEEE Trans. Nucl. Science 14, 782 (1967).
- (5) - G. Yonas et al., Development and Applications of a 1 MV - 1 MA Mylar Dielectric Pulsed Electron Accelerator and Concepts for High Energy Modular Generators Systems, Physics International Co. Report PIR-26-71 (1971).
- (6) - R. L. Hirsch, Laser and Intense Relativistic Electron Beams: Selected Aspects of the Application to Controlled Fusion, Statement before the Joint Committee on Atomic Energy (1971).
- (7) - J. Chang et al., Sandia REB Fusion Program, Relativistic Electron Beam Induced Fusion, IAEA-CN-33/F 2-2.
- (8) - G. Yonas, Applications of High Intensity Relativistic Electron Beams to Pulsed Fusion and Collective Ion Acceleration, Inter. School of Applied Physics, Course on High Intensity Relativistic Particle Beams: Phenomena and Applications, Erice (1976).
- (9) - L. S. Levine, Pulse Power.: a New Technology for Controlled Thermonuclear Fusion, Proc. of the 10th Annual IEEE Region 3 Convention, Southeaston (1972).
- (10) - N. G. Basov et al., Laser Operating in the Vacuum Region of the Spectrum by Eccitation of Liquid Xenon with an Electron Beam, JEPT Letters 12, 329 (1970).
- (11) - E. L. Patterson et al., Intense Electron Beam Excitation of the 3371 A  $N_2$  Laser System, Appl. Phys. Letters 7, 290 (1972).
- (12) - A. N. Chester, Chemical Lasers, Intern. School of Applied Physics, Course on Physics and Technology of High Power Gas Lasers, Capri (1975).
- (13) - L. Bartolini et al., Nitrogen Laser Excitation with a Relativistic Electron Beam, Escampig, Innsbruck (1973).
- (14) - N. G. Basov, Gas Lasers at High Pressures, JEPT Letters 14, 285 (1971).
- (15) - J. D. Daugherty, Electron Beam Sustainer Laser, Symp. on High Power Molecular Lasers, Quebec (1972).
- (16) - C. A. Festermacher, High Energy Short-Pulse  $CO_2$  Amplifier Systems Based Upon Electron-Beam-Controlled Discharge Pumping, VII Inter. Quantum Electronic Conference, Montreal (1972).

- (17) - Y. Carmel and J. A. Nation, Microwave Emission from an Anisotropy Instability in a High-Current Relativistic Electron Beam, Cornell Univ. Report LPS 129 (1973).
- (18) - M. Friedman and M. Herndon, Emission of Coherent Microwave Radiation from a Relativistic Electron Beam Propagating in a Spatially Modulated Field, Phys. Rev. Letters 29, 55 (1972).
- (19) - V.I. Veksler et al., Collective Linear Acceleration of Ions, Proc. of Intern. Conf. on High Energy Accelerators, Cambridge (1967), p. 289.
- (20) - D. Keefe, Collective Effect Accelerators, Scientific American 226 (4) 22 (1972).
- (21) - N. Rostoker, Relativistic Beam Theory, DASA Report 2155
- (22) - S. Putnam, Theoretical Studies of Intense Relativistic Electron Beam Plasma Interactions (Final Report), Physics Intern. Co. Report PIFR-72-105.
- (23) - J. Rander et al., Charged-Particle Acceleration by Intense Electron Streams, Phys. Rev. Letters 24, 8 (1970).
- (24) - S. E. Graybill and J. R. Uglum, Observation of Energetic Ions from a Beam Generated Plasma, Appl. Phys. 41, 1 (1970).
- (25) - J. P. Freytag, Generateurs a Tayons X Eclairs, I<sup>o</sup> Partie: Tubes, Revue Technique Thomson-CSF 1, (4) (1969).
- (26) - C. E. Clayton, The Generation of Recurring High Voltage X Ray Impulses, Proc. of IEEE 99, 206 (1952).
- (27) - O. P. Pecherskii et al., Generator with Water Dielectric for Producing Intense Pulses of Fast Electrons and Hard X Radiation, Soviet Phys. Doklady 15, (6) (1970).
- (28) - E. A. Abramyan et al., Generator of Short Pulses of High Intensity X Ray, Soviet Phys. -Doklady 15, (4), (1970).
- (29) - E. Marx, Deutsches Reichpatent N<sup>o</sup> 455933, (1923).
- (30) - A. D. Blumlein, Electrical Waves, U.S. Patent N<sup>o</sup> 2,465,840 (1949).