

Scuola Nazionale

**Rivelatori ed Elettronica per Fisica delle Alte Energie, Astrofisica ed Applicazioni Spaziali**

INFN Laboratori Nazionali di Legnaro, 4-8 aprile 2005

# Gli acceleratori di elettroni

Piergiorgio Fuochi

**fuochi@isof.cnr.it**

Istituto per la Sintesi Organica e la Fotoreattività

Consiglio Nazionale delle Ricerche

Via P. Gobetti, 101 - 40129 Bologna

## Gli acceleratori di elettroni

Gli acceleratori di elettroni sono macchine che convertono energia elettrica in corrente elettronica e rappresentano una valida alternativa alle sorgenti radioattive per produrre radiazioni ionizzanti. Sono intrinsecamente sicuri, precisi, facilmente controllabili e, contrariamente alle sorgenti radioattive, possono essere accesi o spenti a piacere. Inoltre le energie del fascio di elettroni e la potenza erogata possono essere modulate su un ampio intervallo.

Il primo tentativo di utilizzare fasci di elettroni accelerati risale al 1913 quando l'americano W.D. Coolidge utilizzò allo scopo un acceleratore da lui stesso costruito. Fu solo verso la seconda metà degli anni cinquanta che grazie ai notevoli progressi dell'industria elettronica stimolata dalle ricerche sui radar fu possibile costruire acceleratori di elettroni più affidabili e potenti a costi ragionevoli.

## Gli acceleratori di elettroni

Attualmente circa 1000-1200 acceleratori di elettroni, con energie comprese tra 0,15 e 10 MeV, sono installati nel mondo e utilizzati per applicazioni industriali. Il limite di 10 MeV è dovuto al fatto che energie superiori possono indurre radioattività nei materiali da trattare e pertanto 10 MeV è il limite massimo di energia per gli acceleratori utilizzati negli impianti commerciali (v. Tabella I)

**Tabella I.** – *Energia di soglia per processi fotonucleari ( $\gamma, n$ ) per vari tipi di materiali\**

Nucleo	Energia di soglia (MeV)
<sup>12</sup> C	18,7
<sup>14</sup> N	10,5
<sup>16</sup> O	15,7
<sup>27</sup> Al	13,1
<sup>40</sup> Ca	15,7
<sup>54</sup> Fe	13,6
<sup>65</sup> Cu	9,91
<sup>70</sup> Zn	9,20
<sup>90</sup> Zr	12,0
<sup>204</sup> Pb	8,20

*\*Le reazioni ( $e, n$ ) hanno gli stessi livelli di soglia*

## Gli acceleratori di elettroni

Data la loro natura corpuscolare e la loro carica elettrica, gli elettroni sono meno penetranti dei raggi  $\gamma$  e dei raggi X aventi la stessa energia: la profondità di penetrazione utilizzabile (*range utile*)  $r$  di un fascio di elettroni avente energia  $E$  ( $E > 1 \text{ MeV}$ ), per l'irraggiamento di un materiale avente densità  $\rho$ , è data dall'equazione:

$$r = \frac{E}{3\rho}$$

I fasci di elettroni, pur avendo un minor potere di penetrazione rispetto ai raggi X o  $\gamma$ , hanno ratei di dose e potenze molto più elevate. Ad es. ratei di dose di 4 kGy/h sono tipici di una sorgente da 1 MCi di  $^{60}\text{Co}$  o di un fascio di raggi X prodotti da un acceleratore di elettroni da 200 kW e 5 MeV di energia, mentre con un acceleratore di elettroni da 50 kW e 10 MeV si può avere un rateo di dose di 5 kGy/s.

**Tabella II.** Percorso (range) massimo di elettroni accelerati in materiali diversi

Energia degli elettroni (MeV)	Range massimo			
	in aria (20°C, 1atm) (m)	in acqua (mm)	in alluminio (mm)	in piombo (mm)
30	109	32	53.8	10.2
10	43.1	49.8	21.7	5.42
1	4.08	4.37	2.05	0.69
0.1	0.13	0.14	0.069	0.027
0.01	0.0024	0.025	0.0013	0.00073

## Vari tipi di acceleratori

Gli acceleratori per uso industriale sono di vario tipo, tuttavia alcune caratteristiche e principi costruttivi sono comuni a tutti. Gli elettroni emessi da un catodo sono accelerati all'interno di un tubo sotto vuoto da un campo elettrostatico oppure da un campo elettromagnetico e "sparati" all'esterno del tubo acceleratore attraverso una sottile finestra di titanio (qualche decina di  $\mu\text{m}$  di spessore) sotto forma di un fascio che va a colpire il prodotto da irraggiare. In questo modo possono essere generati fasci di elettroni con energie e intensità di correnti elevate. Voltaggio, e quindi energia, e corrente del fascio sono i due parametri che caratterizzano un acceleratore. Il primo determina il potere di penetrazione degli elettroni nel prodotto mentre, a parità di voltaggio o energia, la corrente del fascio determina, in proporzionalità diretta, la quantità di prodotto che può essere trattato.

Queste macchine vengono classificate o in base al modo di operare o in base all'energia degli elettroni emessi.

Nel primo caso gli acceleratori si distinguono:

- in acceleratori operanti in corrente continua (DC) o ad "azione diretta",
- in acceleratori a radiofrequenza (RF) o ad "azione indiretta".

## Vari tipi di acceleratori

Negli acceleratori in corrente continua una differenza di potenziale applicata direttamente tra la sorgente di elettroni (catodo) e l'elettrodo opposto (anodo) viene usata per accelerare gli elettroni, come nelle **macchine elettrostatiche**, oppure trasferita induttivamente agli elettroni come nelle **macchine a trasformatore**. L'energia finale degli elettroni prodotti dagli acceleratori in corrente continua è direttamente proporzionale alla differenza di potenziale che esiste nel tubo acceleratore. Negli acceleratori a radiofrequenza invece, gli elettroni vengono accelerati passando sempre attraverso un campo elettrico, non più statico, ma alternato perché associato alla componente sinusoidale di un'energia a radiofrequenza (RF).

La classificazione più appropriata degli acceleratori è quella fatta in base all'energia del fascio degli elettroni, in quanto l'energia determina la profondità di penetrazione della radiazione e quindi il settore di utilizzo. Secondo questo metodo gli acceleratori sono suddivisi in tre gruppi:

- a. acceleratori di bassa energia (0,15-0,5 MeV),
- b. acceleratori di media energia (0,5-5 MeV),
- c. acceleratori d'alta energia (5-10 MeV).

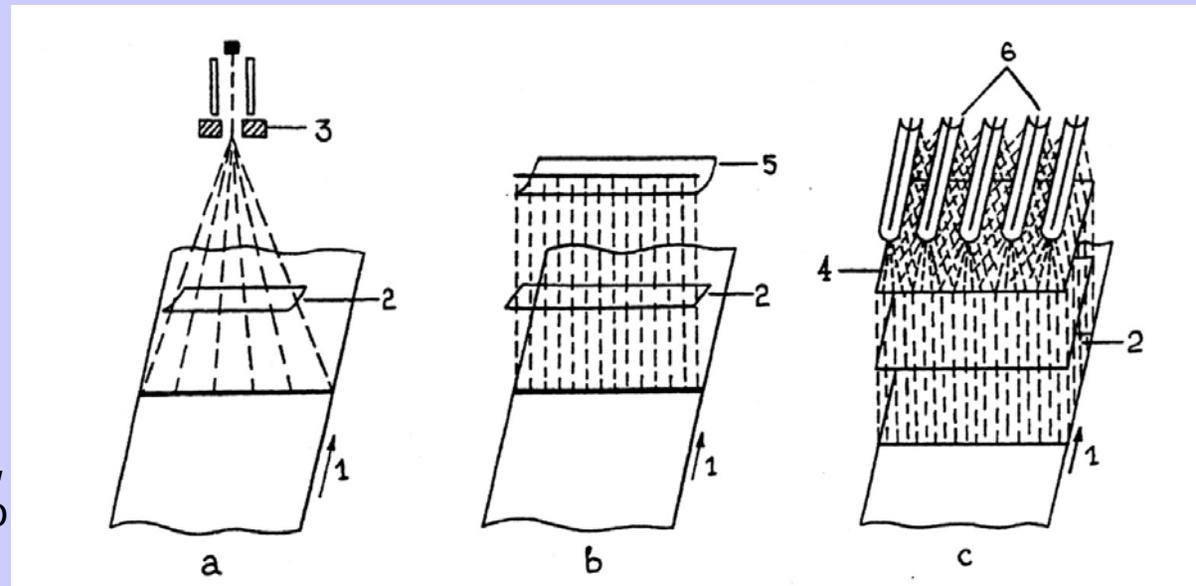
## Acceleratori di bassa energia

Gli acceleratori da 150 a 500 keV sono macchine elettrostatiche e sono, in genere, costruiti come una unità della linea di produzione per il trattamento e la schermatura necessaria per le radiazioni è parte integrante della macchina. Queste macchine (figura in basso) sono piccole e compatte così da poter essere incorporate facilmente sia in linee di produzione nuove che in impianti preesistenti. Avendo i loro fasci bassa capacità di penetrazione, trovano esclusivamente impiego per trattamenti in superficie e per irraggiare rivestimenti e film sottili.

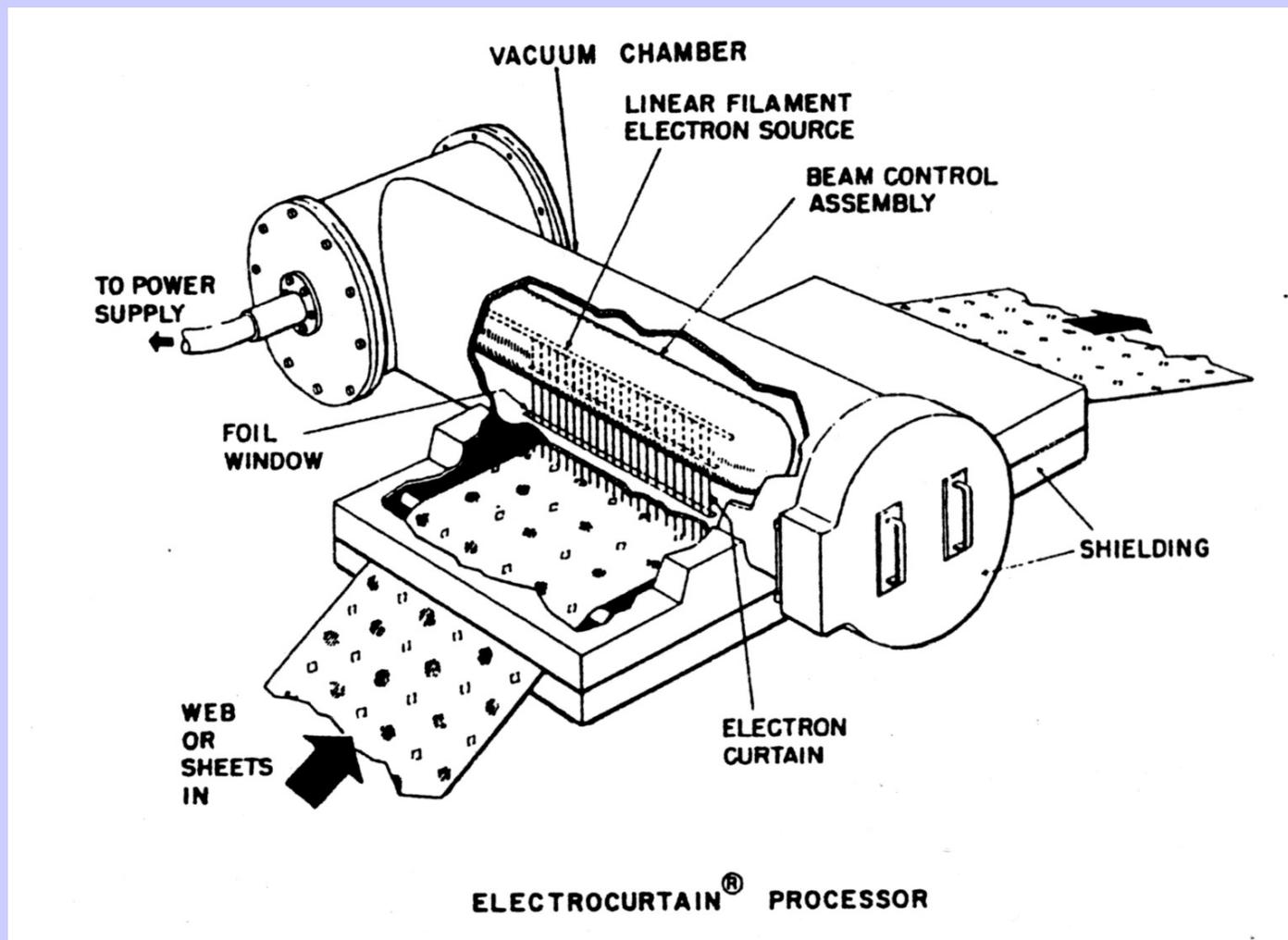
In base al modo con cui sono costruiti gli acceleratori di bassa energia vengono così suddivisi:

- Acceleratori a scansione
- Acceleratori a cortina
- Acceleratori a multicatodo

Questi tre tipi di acceleratori, in forma schematizzata, sono mostrati nella figura a destra.



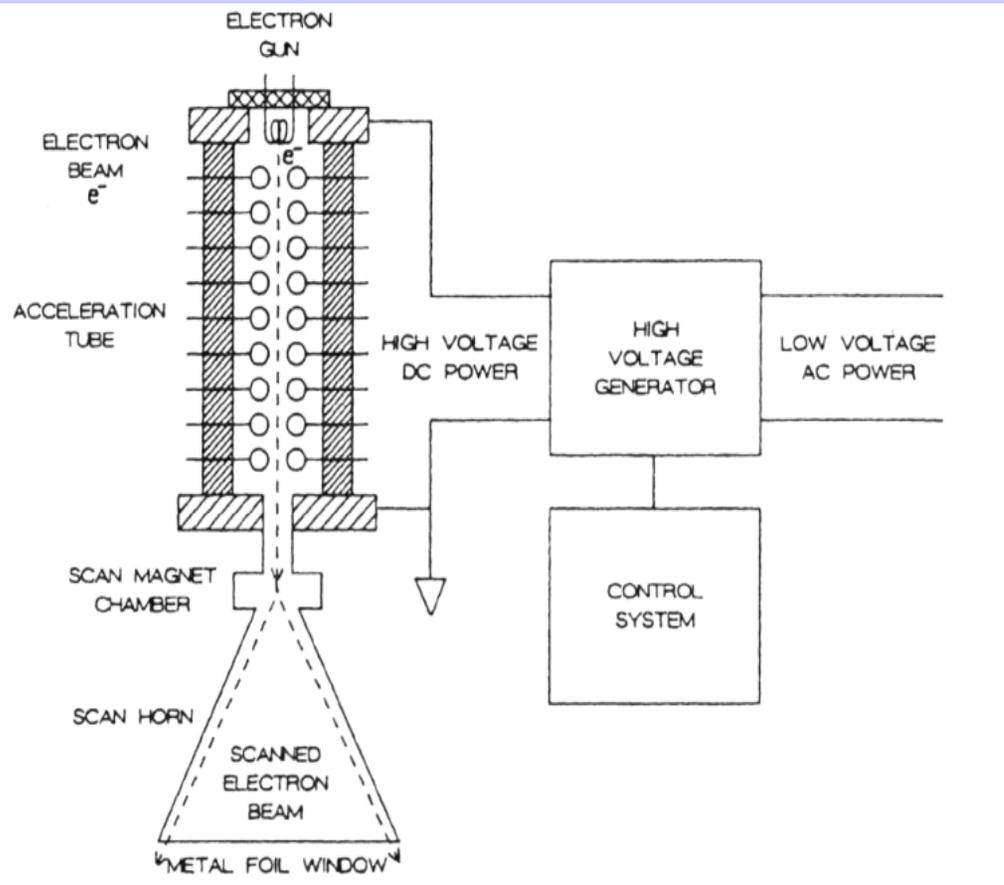
## Acceleratori di bassa energia



*Schema di acceleratore a cortina Electrocurtain®*

# Acceleratori di media energia

La figura in basso mostra lo schema di un acceleratore in corrente continua. Dalla figura si può vedere che i componenti principali dell'acceleratore sono:

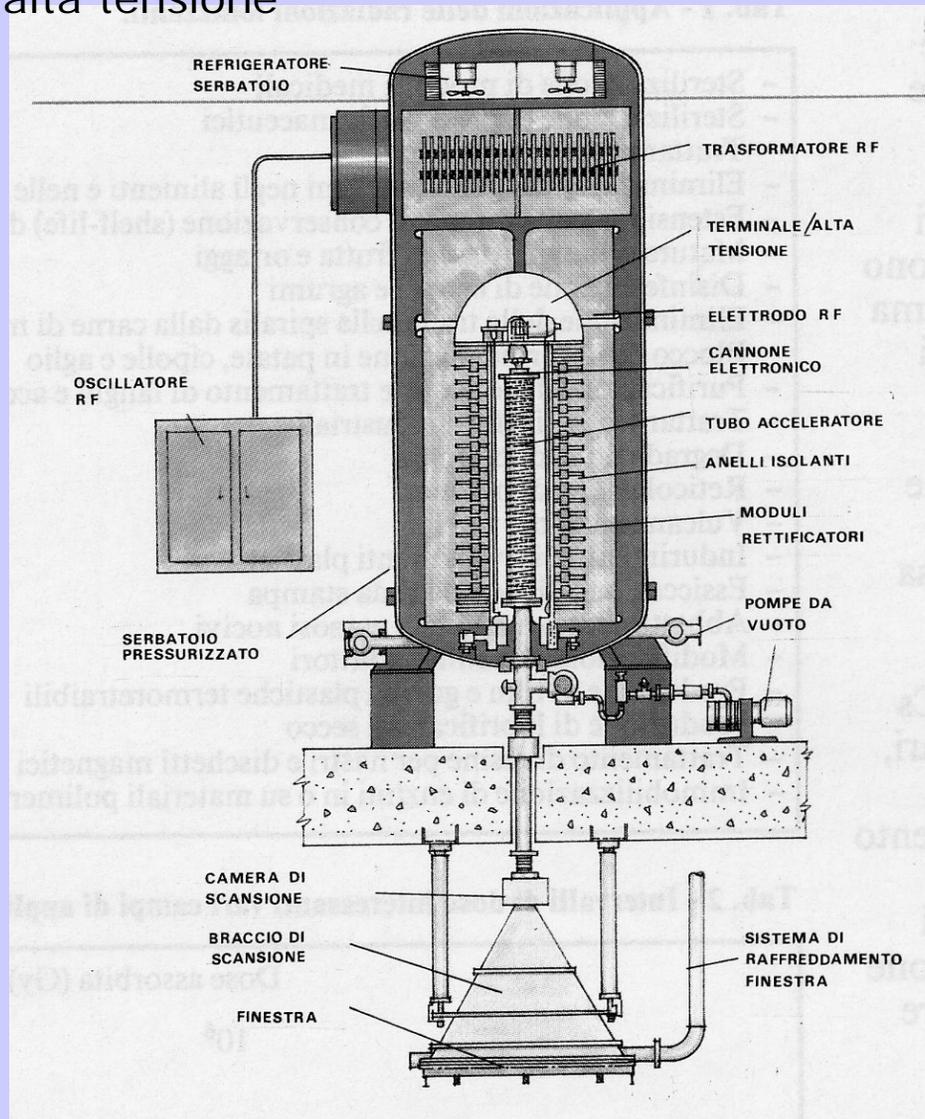


- un generatore di alta tensione,
- una sorgente di elettroni,
- un tubo sotto vuoto spinto dove gli elettroni sono accelerati da una serie di elettrodi con tensioni a gradini a crescere tra il catodo con voltaggio negativo ed il potenziale di terra,
- un sistema di scansione del fascio su tutta la superficie da irraggiare nel caso di superfici estese.

***Schema semplificato di un acceleratore in Corrente Continua (DC)***

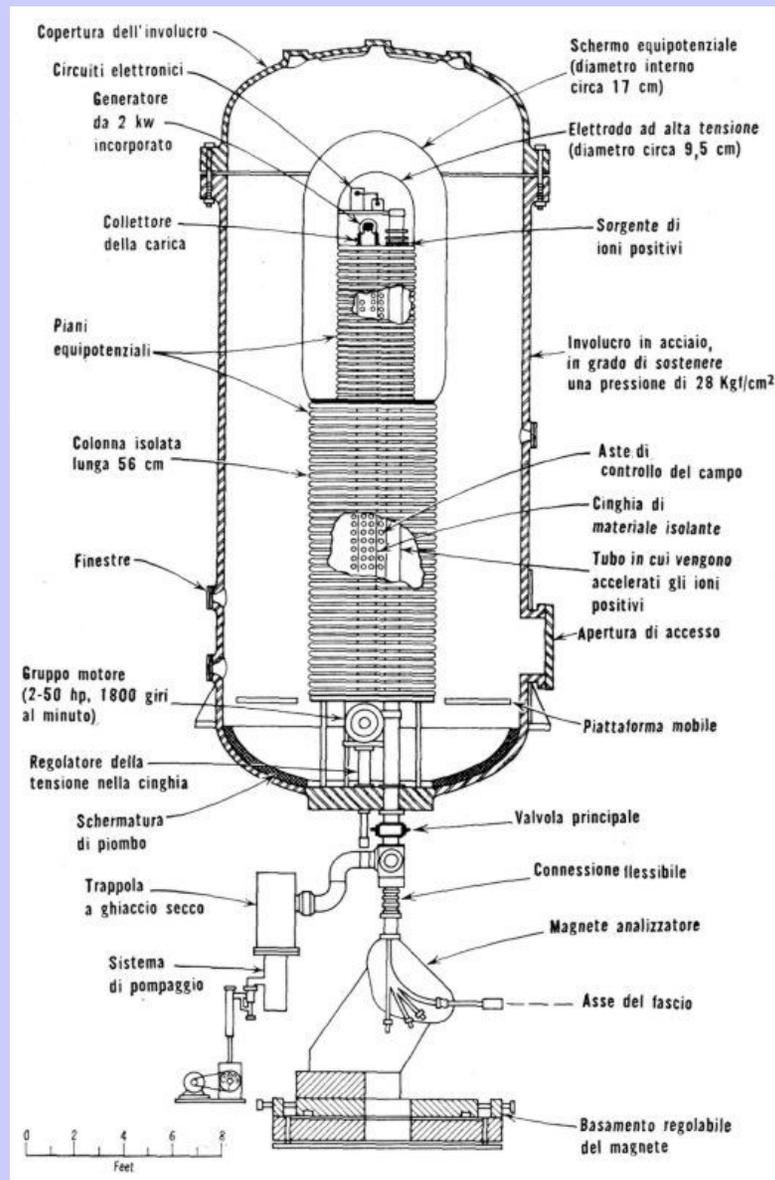
# Acceleratori di media energia

Il Dynamitron utilizza un sistema di rettificatori in cascata ad accoppiamento parallelo per creare alta tensione



***Schema dettagliato di un acceleratore elettrostatico tipo Dynamitron***

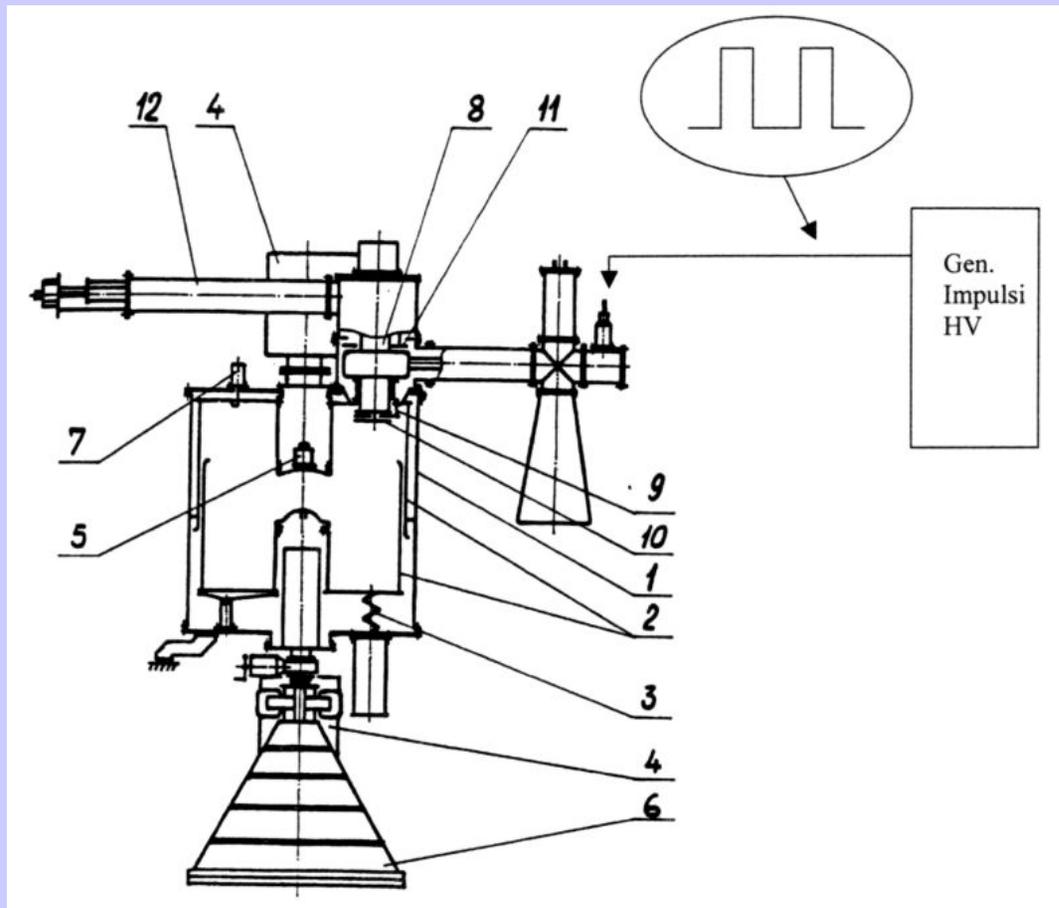
## Acceleratori di media energia



***Schema di acceleratore Van de Graaf.***

## Acceleratori di media energia

L'acceleratore del tipo ILU è a radiofrequenza a cavità toroidale risonante, formata da due parti delle quali una entra parzialmente nell'altra, montate all'interno di un serbatoio in acciaio sottovuoto.



***Elementi fondamentali di un acceleratore di tipo ILU:***

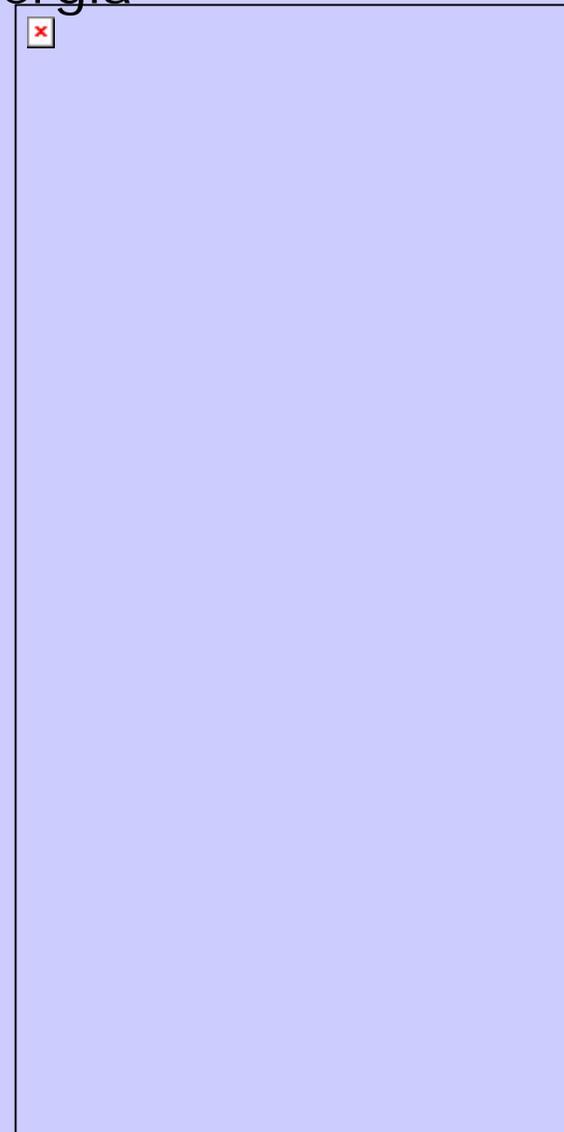
- 1) serbatoio contenitore,***
- 2) cavità risonante,***
- 3) bobina induttiva,***
- 4) bobina di scansione,***
- 5) iniettore di elettroni,***
- 6) camera di scansione "scanner",***
- 7) antenna di misura RF,***
- 8) oscillatore.***

# Acceleratori di alta energia

L'utilizzo di campi elettrostatici per accelerare elettroni porta ad una limitazione delle energie raggiungibili ( $< 5$  MeV e con particolari accorgimenti fino a circa 8 MeV) a causa di problemi di isolamento che insorgono nelle strutture isolanti allorché queste sono sottoposte a tensioni statiche superiori al milione di eV per metro.

Questi limiti elettrostatici sono agevolmente superati usando tensioni alternate, che permettono di ottenere sia l'accelerazione ciclica, sia campi elettrici molto più elevati senza perforazione degli isolanti.

Gli acceleratori lineari si distinguono in acceleratori lineari a onda viaggiante (Figura a destra) e a onda stazionaria.

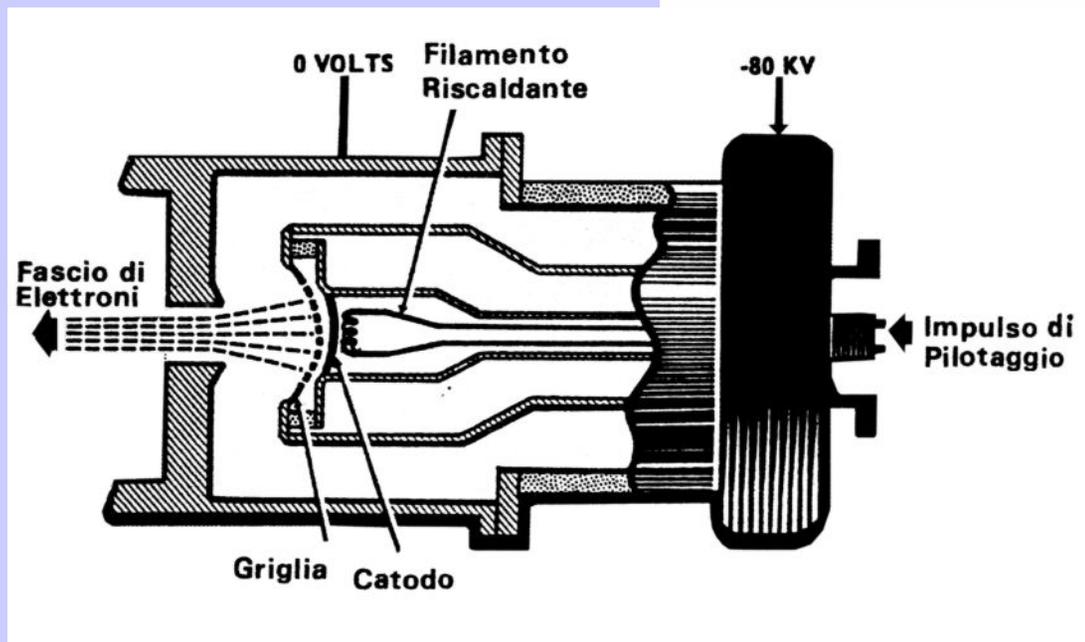
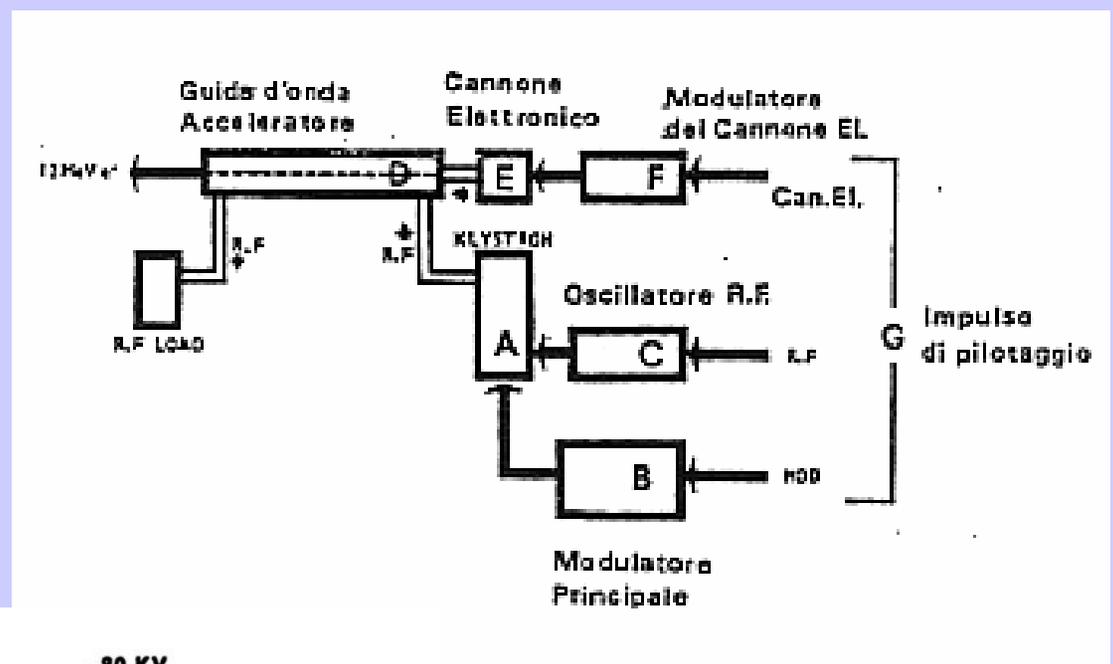


***Rappresentazione schematica di un  
acceleratore lineare ad onda  
viaggiante***

# Acceleratori di alta energia

A destra:

Schema a blocchi di un acceleratore lineare



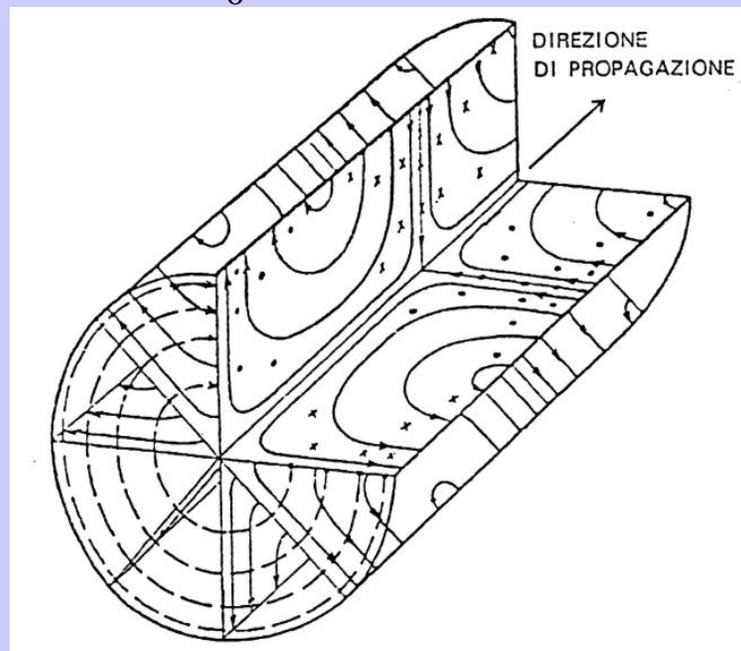
A sinistra:

Struttura di un cannone elettronico

## Acceleratori di alta energia

Gli elettroni viaggiano nella guida, in cresta all'onda o non lontano dalla cresta, in modo da usufruire della massima intensità del campo acceleratore e quindi sottoposti in continuazione a un campo acceleratore  $E_z(z)\cos\varphi(z)$  (dove  $E_z$  è il valore di cresta e  $\varphi$  la fase del pacchetto di elettroni rispetto alla cresta, ambedue in genere variabili con  $z$ ), ed escono dalla guida lunga  $L$  con un incremento d'energia dato dalla relazione:

$$eV = e \int_0^L E_z(z) \cos \varphi(z) dz$$



***Modo  $TM_{0,1}$  in una guida circolare liscia. Le linee a tratto pieno rappresentano il campo elettrico, le tratteggiate il campo magnetico***

# Acceleratori di alta energia

## Funzionamento schematico di un klystron

Il cannone elettronico ① produce un flusso di elettroni.

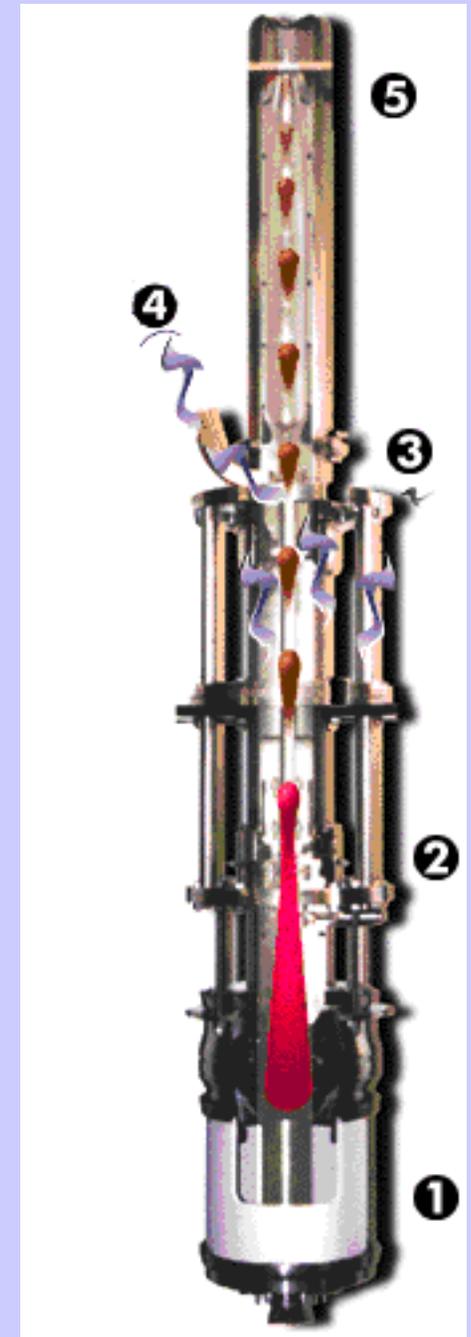
Le cavità d'impacchettamento ② regolano la velocità degli elettroni in modo da farli arrivare in pacchetti all'uscita della cavità.

I pacchetti di elettroni all'uscita della cavità ③ del klystron generano le microonde (RF).

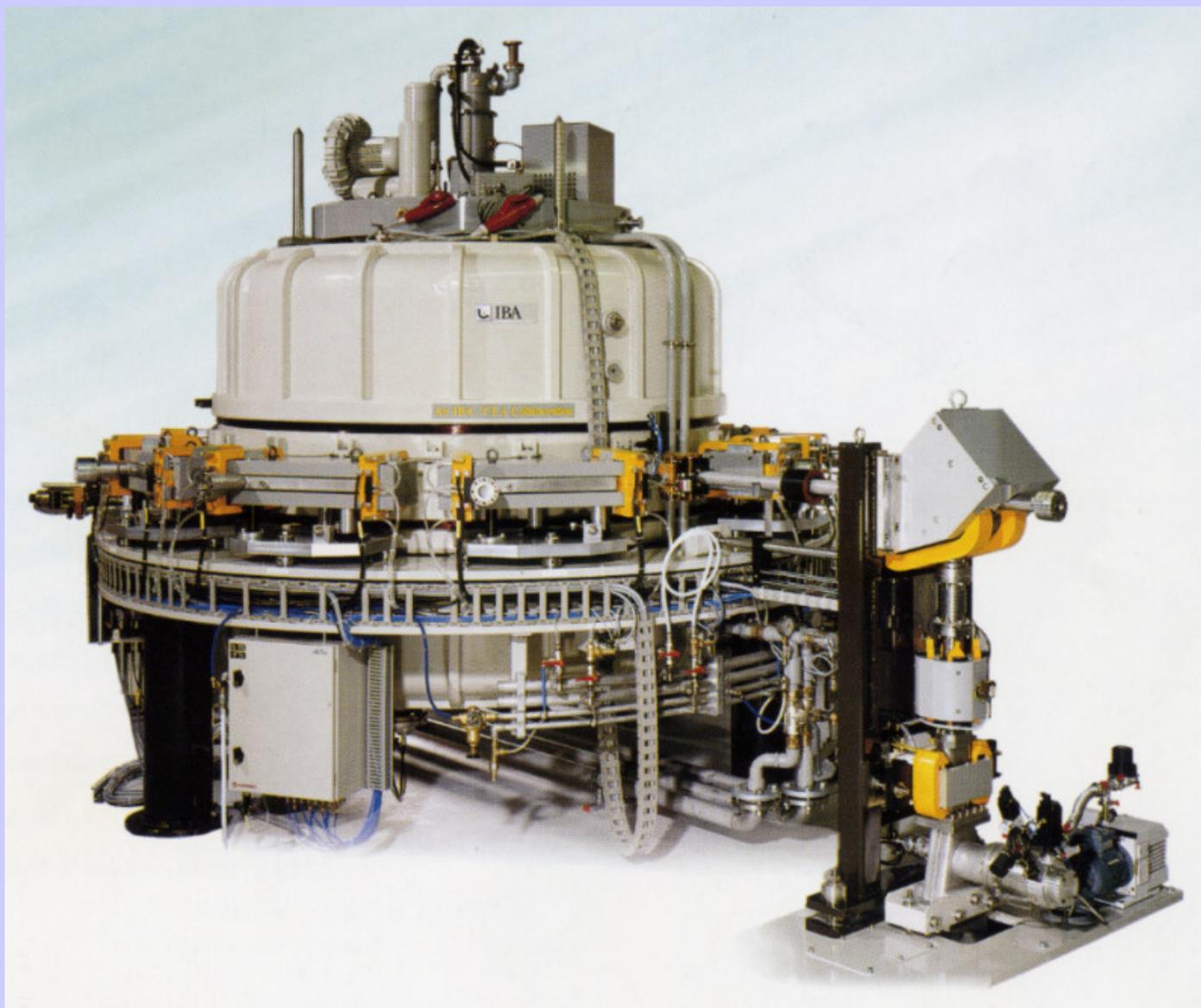
Le microonde fluiscono nella guida d'onda ④ che li trasporta all'acceleratore.

Gli elettroni sono assorbiti nell'assorbitore del fascio ⑤.

<http://www2.slac.stanford.edu/vvc/accelerators/klystron.html>

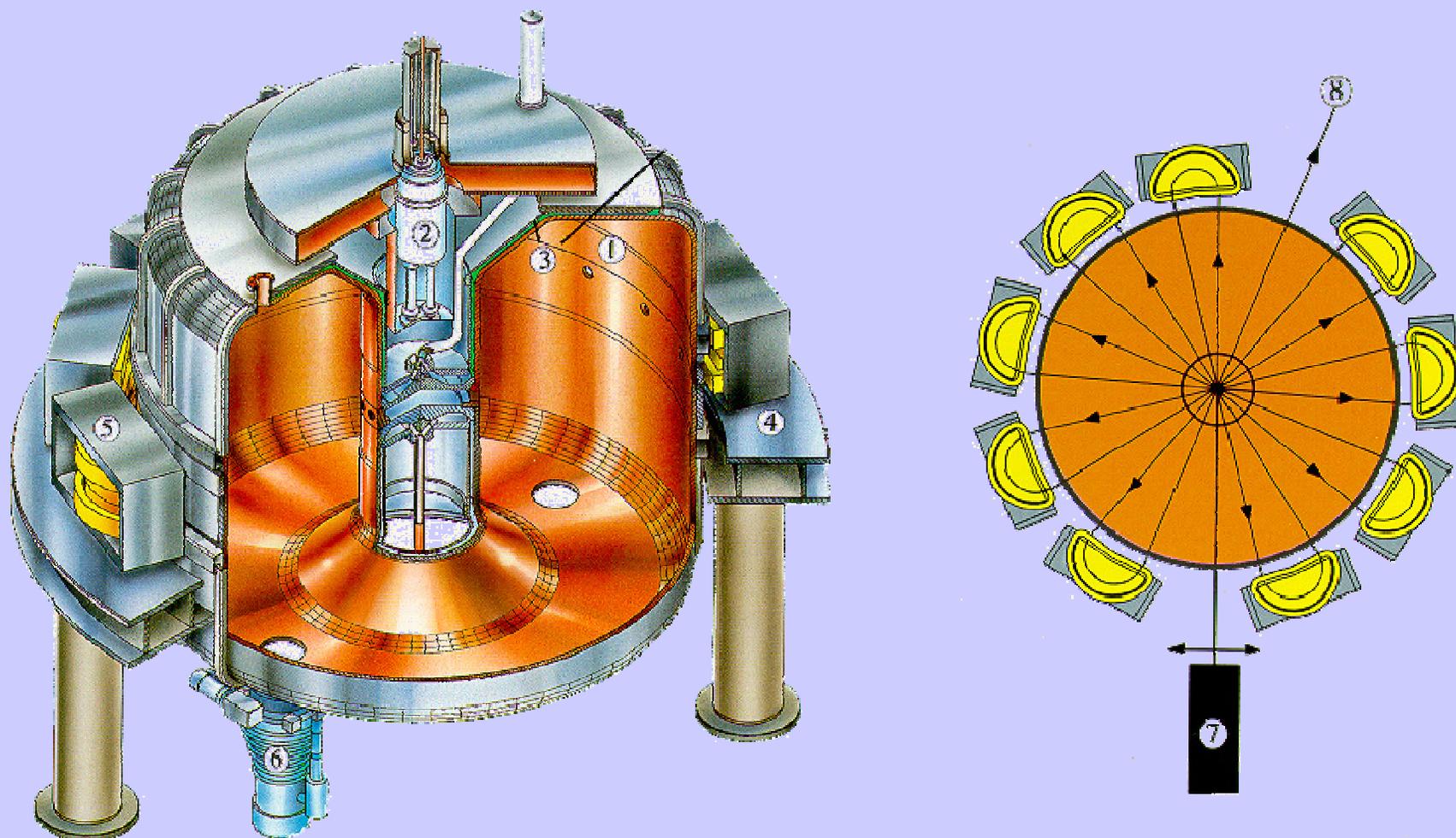


# Acceleratori di alta energia



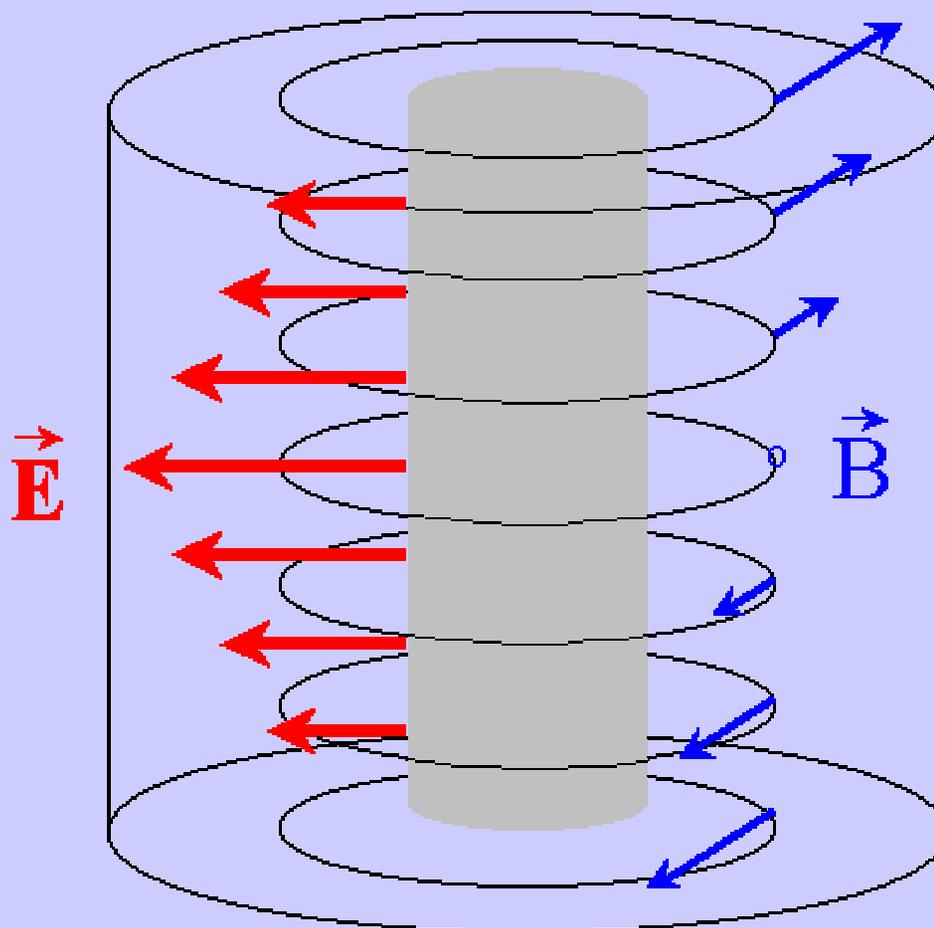
***Acceleratore Rhodotron® della IBA***

# Acceleratori di alta energia



*Spaccato di un acceleratore Rhodotron®*

## Acceleratori di alta energia



*Andamento dei campi elettrico e magnetico nel Rhodotron®*