

# Acceleratori di particelle

Sebbene gli acceleratori del protone esistessero fin dai primi anni '30, le loro basse energie avevano limitato le loro applicazioni alla fisica nucleare.

Le prime macchine includevano:

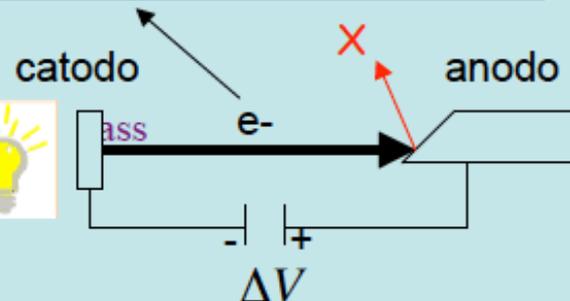
- i generatori elettrostatici di Robert J. Van de Graaf, sviluppati a Princeton,
- l'acceleratore del moltiplicatore di tensione costruito da J. D. Cockroft e E. T. S. Walton al Laboratorio Cavendish
- il ciclotrone costruito da Ernest O. Lawrence e Stanley Livingston a Berkeley.

# Primi Acceleratori Lineari Elettrostatici

Il primo acceleratore fu un apparecchio, realizzato da Roentgen (Premio Nobel), costituito da un'ampolla a vuoto con dentro un catodo connesso al polo negativo di un generatore di tensione. Riscaldato, il catodo, emetteva elettroni che fluivano accelerati dal campo elettrico verso l'anodo (a tensione positiva). Dall'urto con l'anodo gli  $e^-$  producevano raggi X.

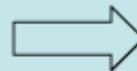
Gli **elettroni** sono estratti dal catodo e, viaggiando verso l'anodo positivo, acquistano un'energia uguale alla loro carica moltiplicata per la differenza di potenziale applicata tra catodo e anodo

L'esempio più semplice di generatore di  $e^-$  è un filamento caldo, come quello di una lampadina



PRINCIPIO:

La differenza di potenziale tra due elettrodi viene usata per accelerare le particelle.



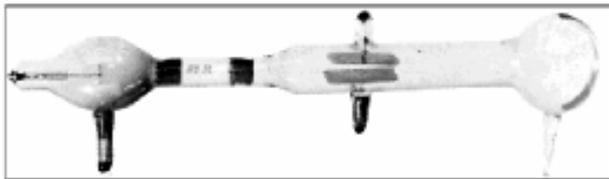
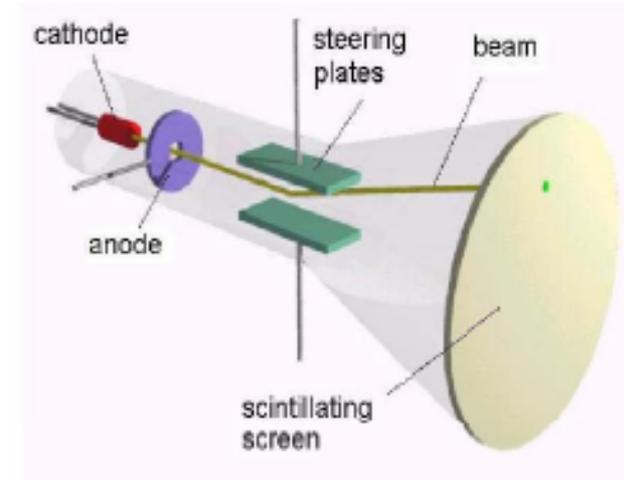
L'energia massima raggiungibile è data dalla massima tensione applicata. Quando  $\Delta V$  è molto alta si possono avere scariche elettriche

$$\Delta E = -e\Delta V$$

$\Delta E$  pochi MeV per unità di carica

# Il primo acceleratore

Elettroni emessi da un filamento caldo  
Catodo negativo ad alta tensione (10kV)  
Anodo a terra  
Piatti deflettori (Oscilloscopio, t. catodico))



CRT of J.J. Thomson (1897)

◆ **la particella guadagna l' energia  $q\Delta V$  :**

20 KV e' facile

100 kV molto difficile ci sono problemi di scarica

◆ **Ci vogliono nuove idee !**

# Generatore Van de Graaf

Utilizza il primo termine della Forza di Lorentz

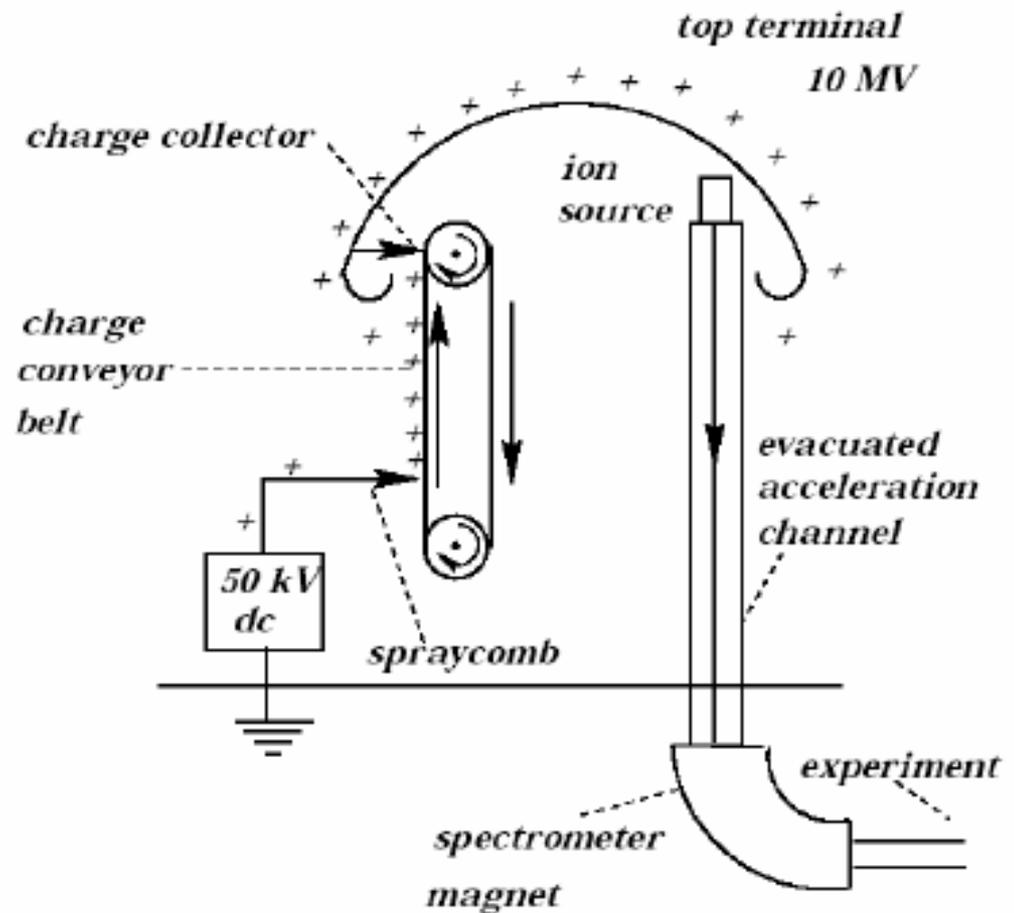
Unità singola (1930) :

Tensione massima:

$$V = 10 \text{ MV}$$

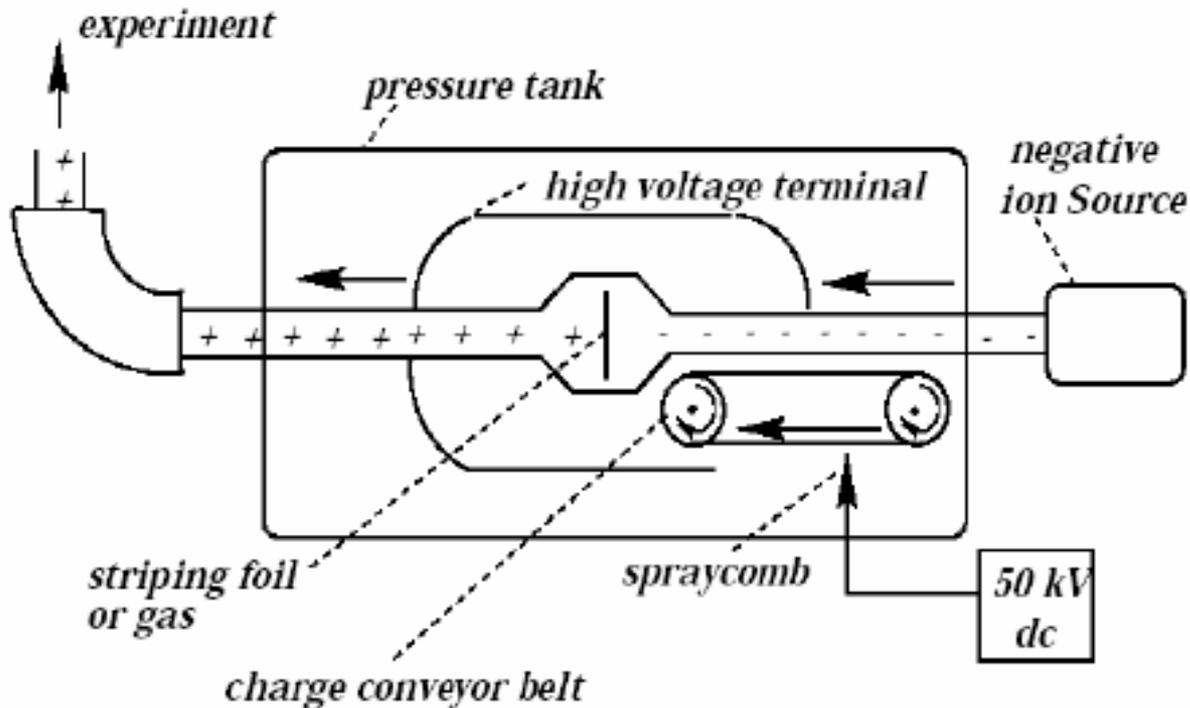
Normalmente si lavora a

$$V = 2 \text{ MV}$$



# Generatore Van de Graaf

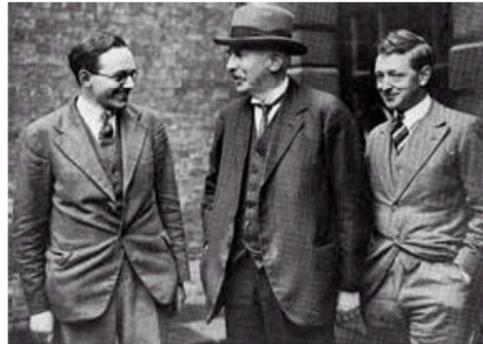
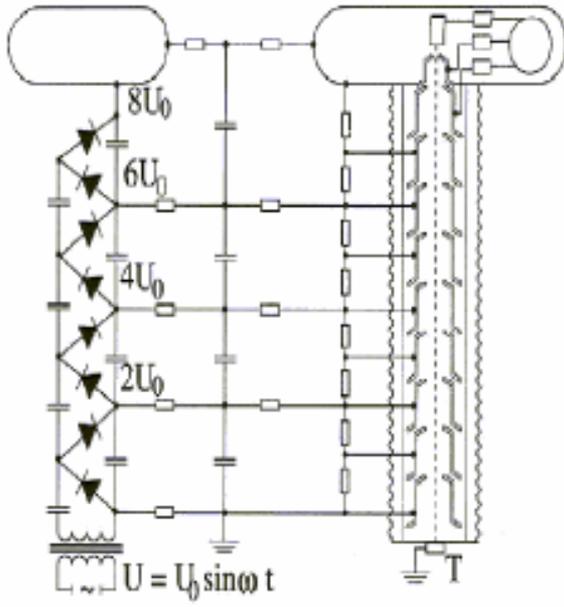
Generatore Tandem (1936):



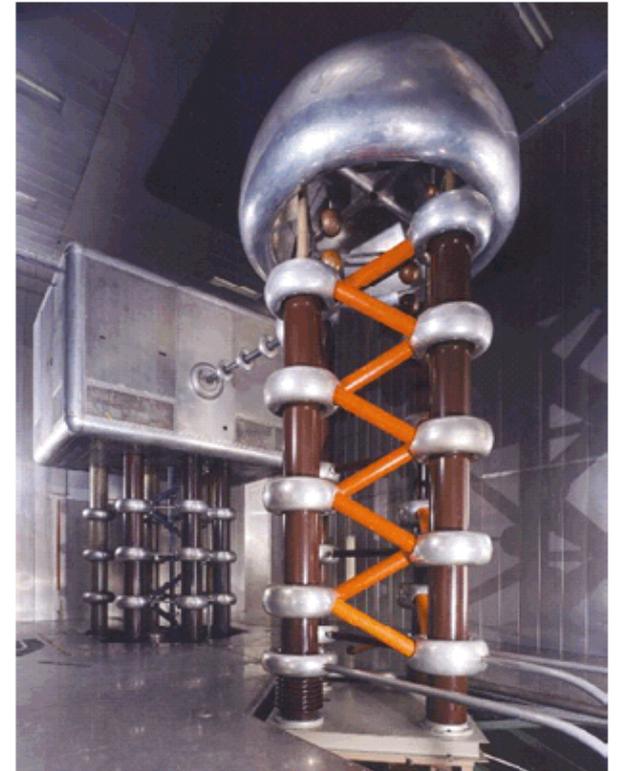
Tensione massima:  $V = 25 \text{ MV}$

# Acceleratore elettrostatico

Cockroft – Walton (1930) :



Cookroft Walton



Voltaggio distribuito su molti elettrodi per controllare il foccheggiamento. Alta corrente ed alta intensità

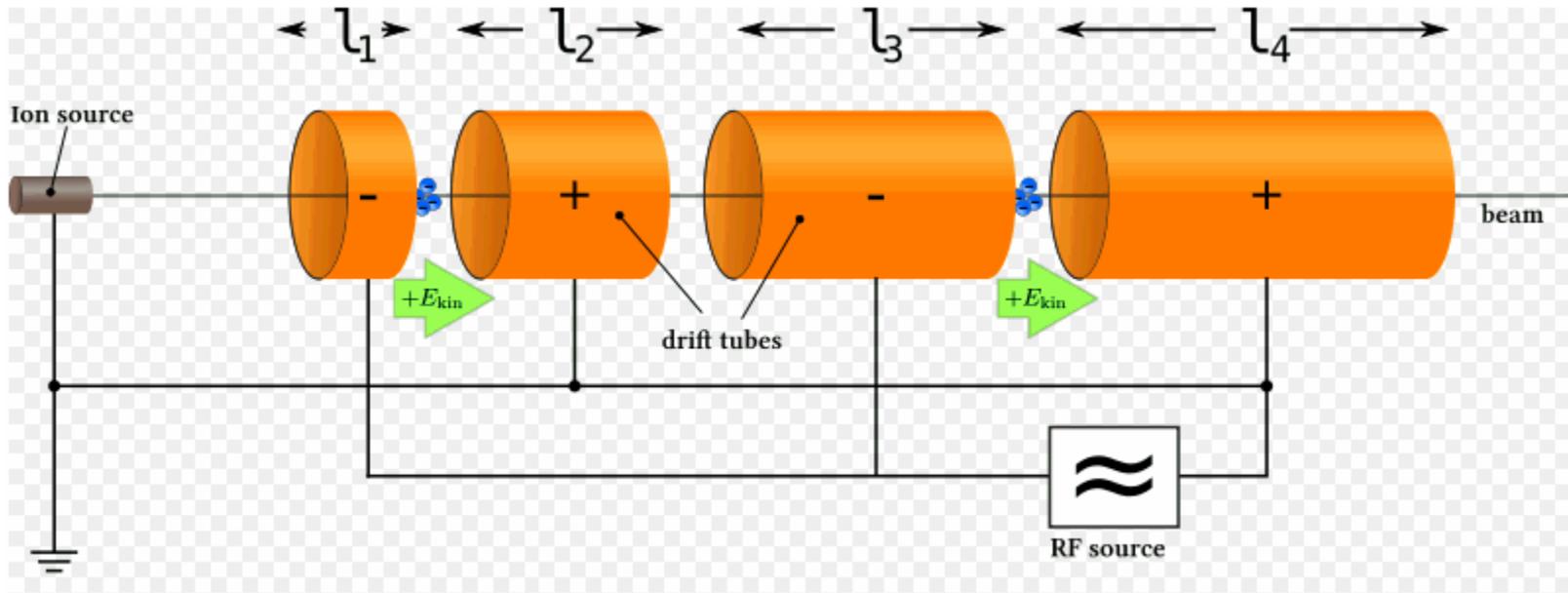
Tensione massima:  $V = 2MV$

# Il passo successivo

- Due strade possibili per aumentare l'energia:
  - Molti stadi di accelerazione l'uno dopo l'altro
    - Acceleratori lineari
  - Un unico stadio di accelerazione attraverso cui si passa molte volte
    - Acceleratori circolari

# Acceleratore Lineare

Wideroe (1928) :



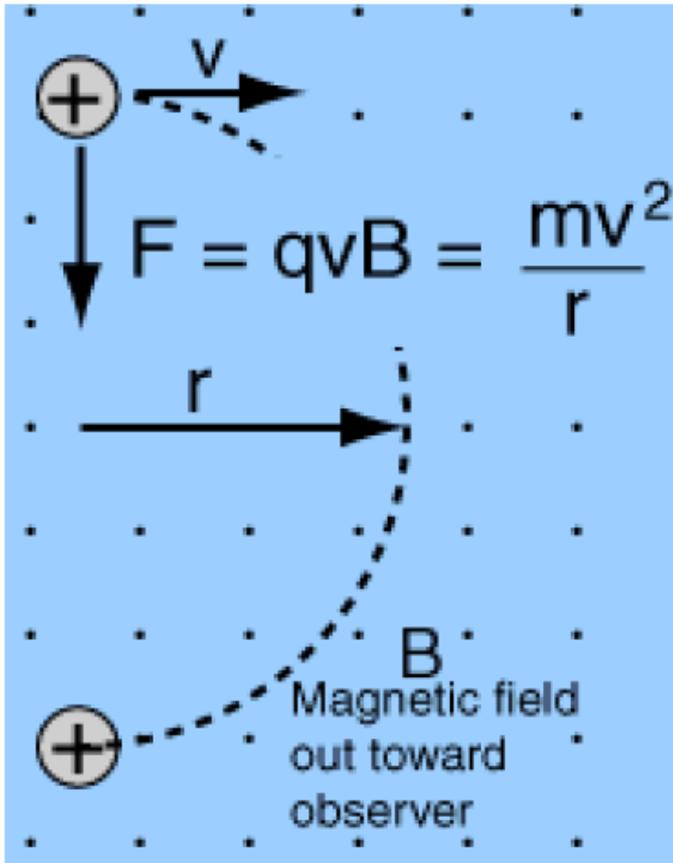
I tubi (gabbie di Faraday) sono connessi a polarit  alternata.  
Accelerazione tra un tubo e l'altro. Inversione polarit  a frequenza  
fissa  $\rightarrow$  Lunghezza tubi aumenta con velocit 

# Linac a Fermilab (400 MeV)



# Acceleratore circolare

Sfrutta la seconda parte della Legge di Lorentz



$$r = mv/Bq$$

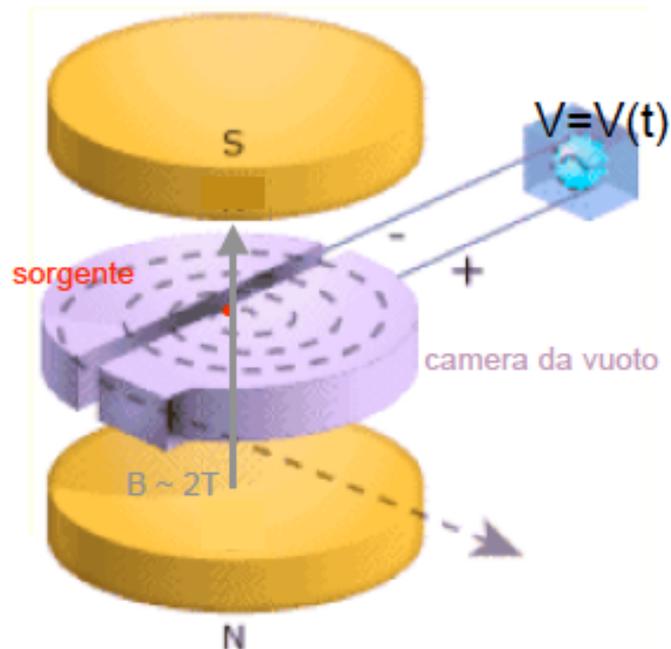
$$T = 2\pi r/v = 2\pi m/ Bq$$

Il tempo con cui una particella carica compie un'orbita circolare è indipendente dalla velocità della particella stessa

# Ciclotrone

Proposto nel 1930 da Lawrence

Principio di funzionamento dimostrato nel 1931 da Livingston



Sorgente di particelle al centro degli elettrodi  
 $E = E(t)$  tra le due sezioni della camera da vuoto  
Le particelle vengono accelerati e si muovono  
su una traiettoria spiraleggiante

$$\omega_z = \frac{e}{m} B_z \quad \text{frequenza di ciclotrone}$$

frequenza di rivoluzione costante

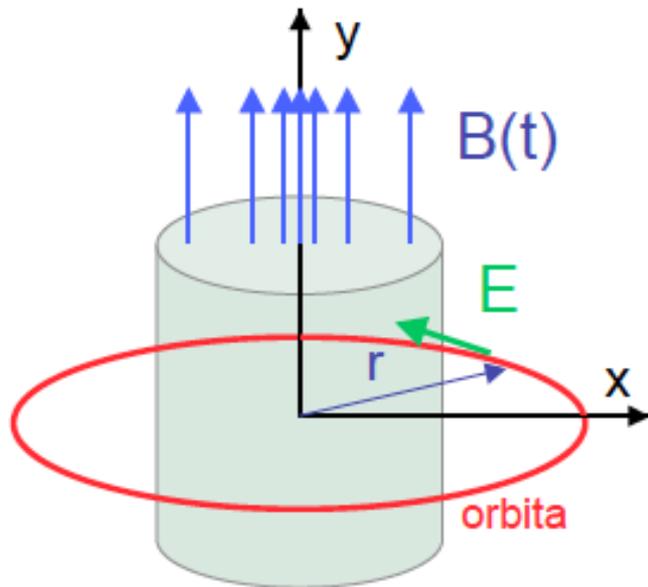
raggio di curvatura aumenta

usato per elettroni, deuteroni e particelle  $\alpha$

# Betatrone

Idea proposta da KERST (1941)

Usato per accelerare  $e^-$  ad un'energia  $E \sim 2.3$  MeV

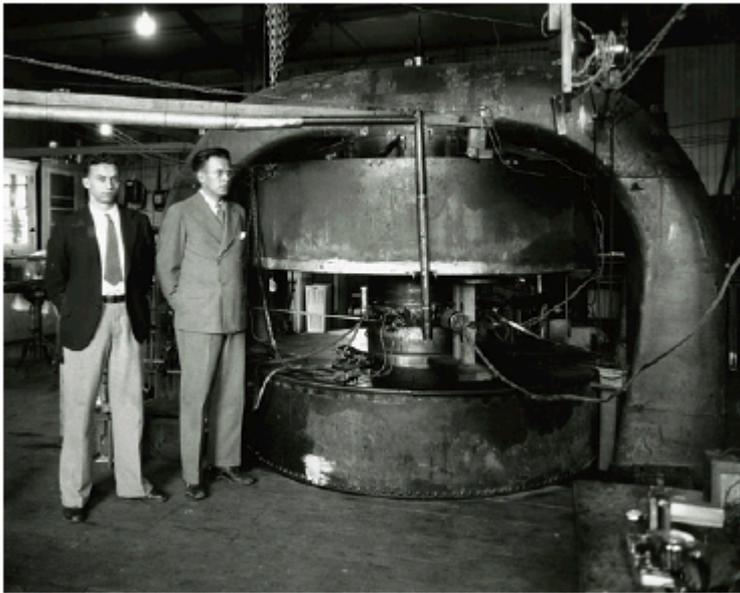


- Le particelle sono accelerate da un campo elettrico  $\mathbf{E}$  prodotto da un campo magnetico che varia nel tempo e nella direzione  $x$
- Regolando opportunamente  $\mathbf{B}$  si può far compiere alle particelle un'orbita circolare
- Ad ogni giro un  $e^-$  viene accelerato e tanto maggiore il numero dei giri tanto più alta è l'energia che si raggiunge

- *Il Betatrone è stato il primo acceleratore in cui le particelle erano accelerate lungo traiettorie circolari chiuse **orbite***
- *Sul betatrone furono osservate per la prima volta le oscillazioni delle particelle accelerate intorno all'orbita di riferimento*
- *Tali oscillazioni furono chiamate **oscillazioni di betatrone!***

# Il Ciclotrone - 2

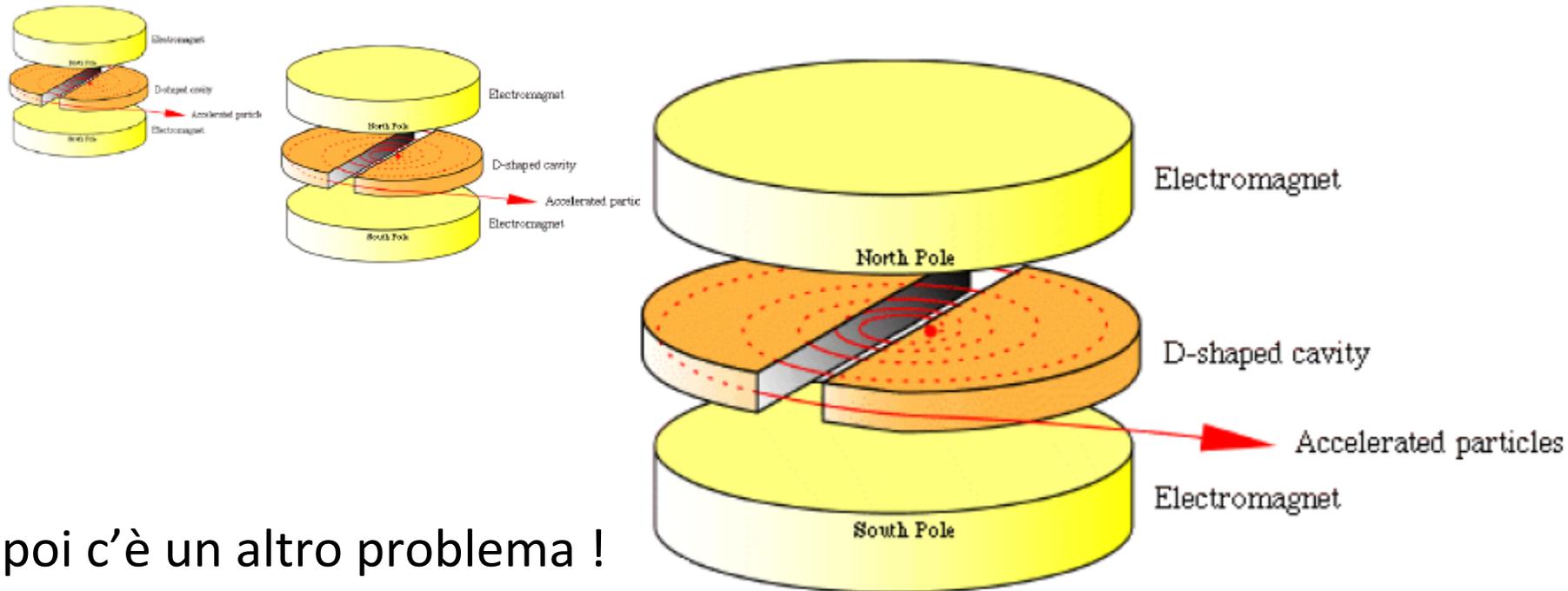
Lawrence e Livingstone (~1930):



Ma energia massima circa 10 MeV

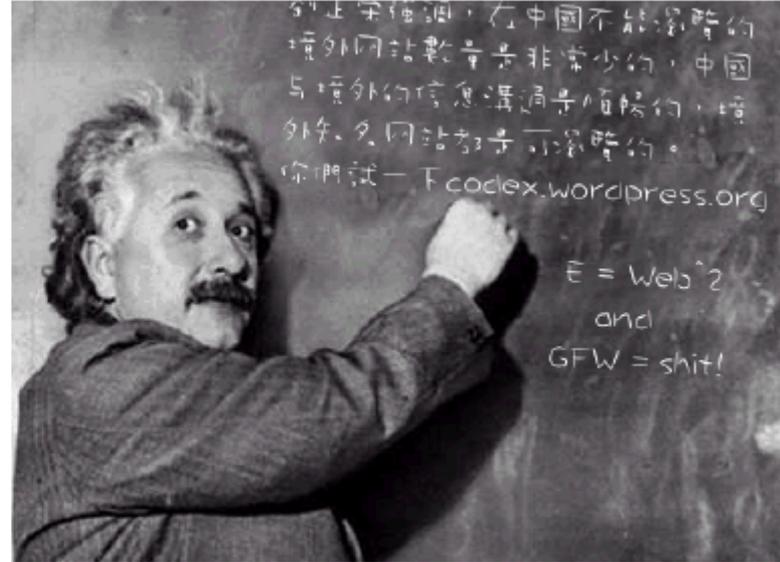
# Il Ciclotrone - 3

Il raggio aumenta con l'energia. Servirebbe troppo ferro !!  
Energia max. circa 500 MeV



E poi c'è un altro problema !

# La relatività



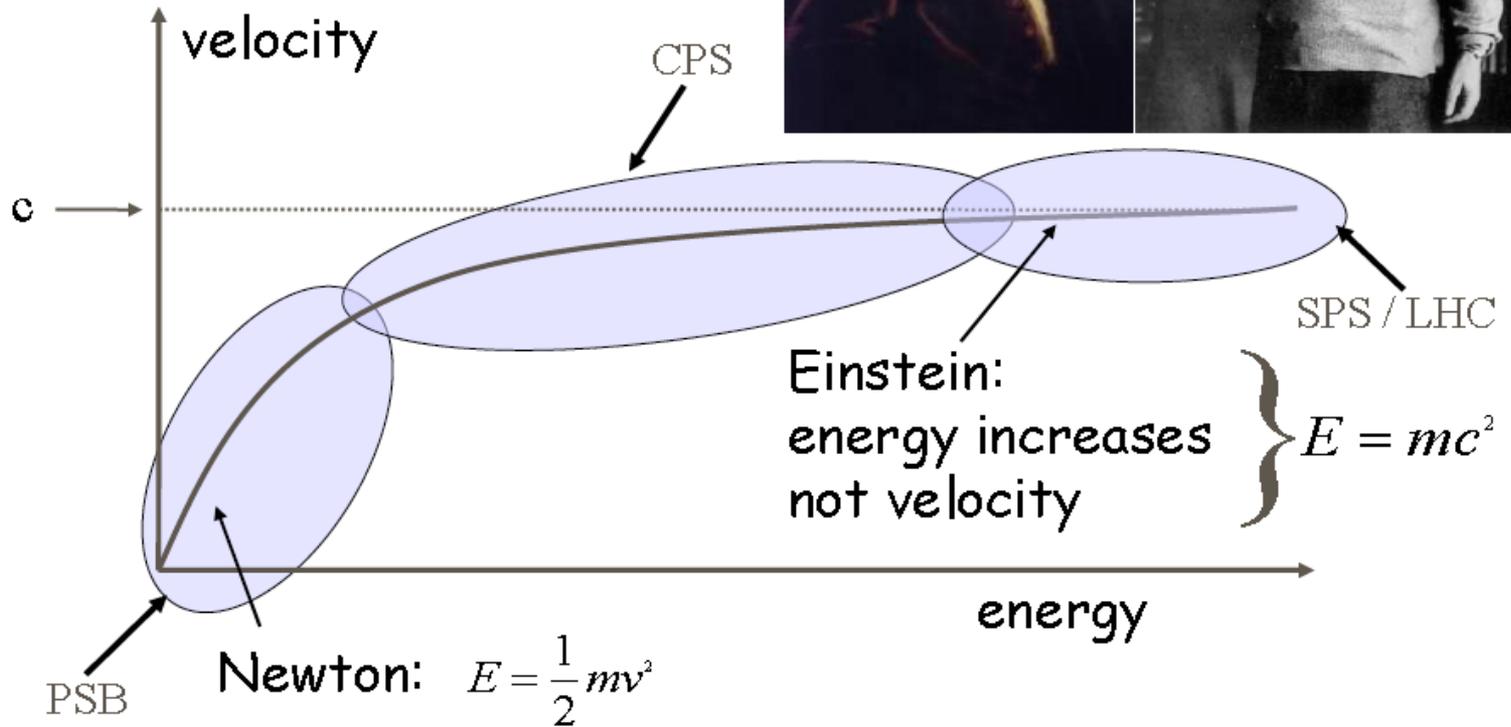
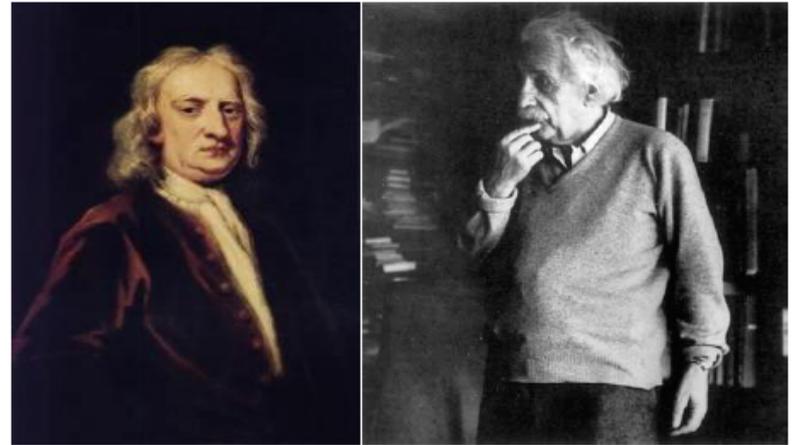
$$T = 2\pi m / Bq$$

$$T = 2\pi m / Bq$$

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Il periodo dell'orbita non è più indipendente da V

# Relatività



→ Bisogna variare la frequenza della tensione !!

→ SINCROCICLOTRONE

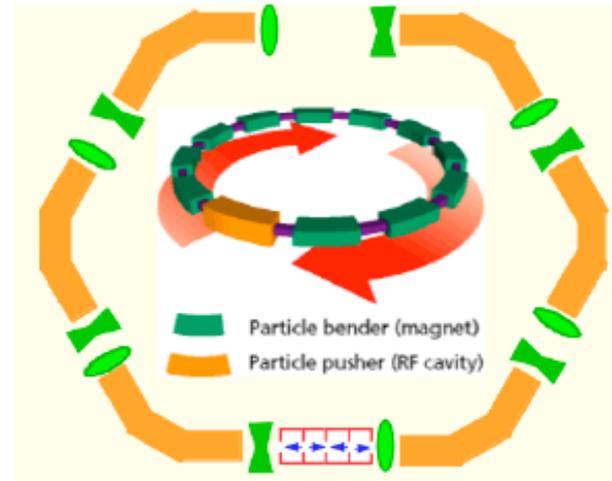
# Sincrotrone

1945 idea proposta nel da Veksler (URSS) and McMillan  
1946 Goward e Barnes costruirono il primo sincrotrone  
1949 Wilson et al. accumularono il primo fascio in un sincrotrone

- *Le particelle ad ogni passaggio successivo aumentano la loro energia grazie alla cavità RF*
- ***B** aumenta in modo da tenere il raggio dell'orbita costante*

$$B\rho = \frac{p}{e} \approx \frac{E}{ce}$$

$$E[\text{GeV}] \approx 0.3B[\text{T}]\rho[\text{m}]$$



Il valore di **B** non è illimitato quindi per raggiungere alte energie è necessario costruire acceleratori con un raggio molto grande

Nel 1948 entrò in funzione il protosincrotrone di Berkeley che accelerava i protoni fino ad un'energia di 350 MeV

→ Nuova era nella fisica delle particelle