



# Acceleratori di particelle



M. Boscolo

Frascati, 30 gennaio 2012

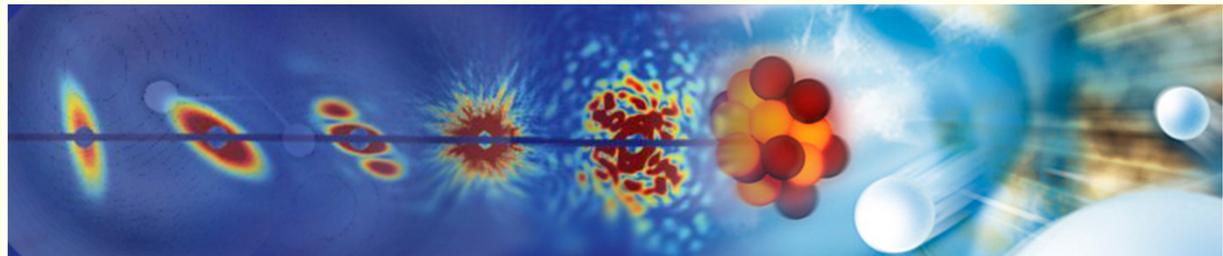
# Piano del colloquio

- Introduzione alla fisica e tecnologia degli acceleratori
- Lezione I: I fondamenti della macchina acceleratrice di particelle
- Lezione II: acceleratori nel mondo e prospettive

# Introduzione agli acceleratori

La scienza moderna è nata con le macchine acceleratrici.

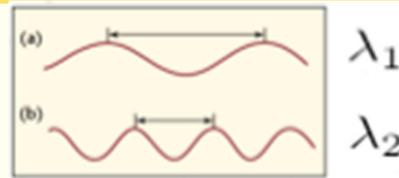
Queste generano le particelle elementari di altissima energia da lanciare contro i bersagli da investigare.



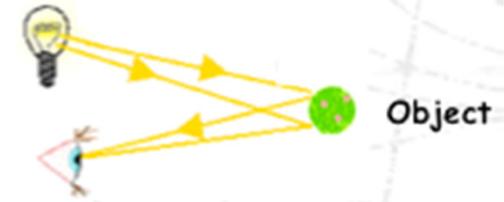
Per scienza moderna intendiamo la ricerca sui fondamenti dell'Universo, sui costituenti fondamentali e sulla struttura microscopica della materia: subnucleare, nucleare, atomica e molecolare.

# Acceleratori come microscopi

Risoluzione definita dalla lunghezza d'onda



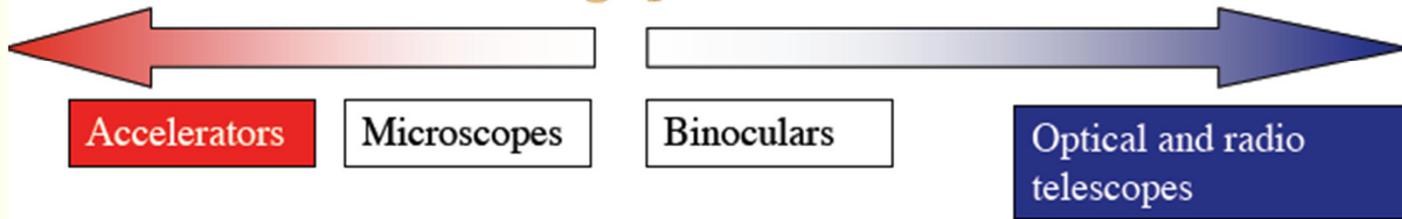
Radiation source ("light")



Detector



$10^{-15}$   $10^{-12}$   $10^{-9}$   $10^{-6}$   $10^{-3}$   $10^0$   $10^3$   $10^6$   $10^9$   $10^{12}$   $10^{15}$   $10^{18}$   $10^{21}$   $10^{24}$  m



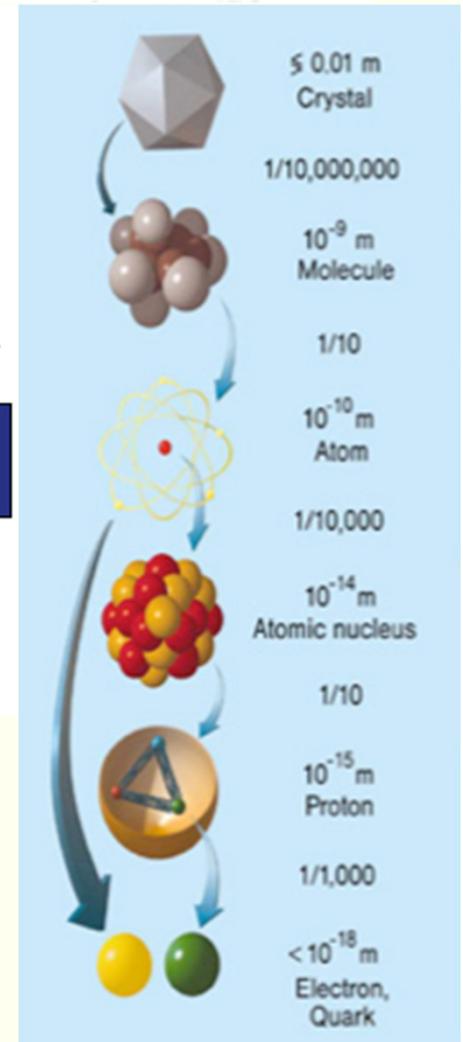
Accelerators

Microscopes

Binoculars

Optical and radio telescopes

Microscopio a grandissima risoluzione:  $\lambda = h/p$   
 $T = 1 \text{ TeV} \Rightarrow \lambda \cong 10^{-18} \text{ m}$



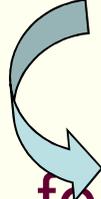
# Perchè accelerare particelle?

I primi acceleratori di particelle furono realizzati per studiare i costituenti più piccoli della materia.

Un fascio di particelle (elettroni, positroni, protoni, ioni,...) che colpisce una targhetta o collide con un altro fascio produce reazioni nucleari, annichilazioni e crea nuove particelle. Lo studio di questi fenomeni con i rivelatori...

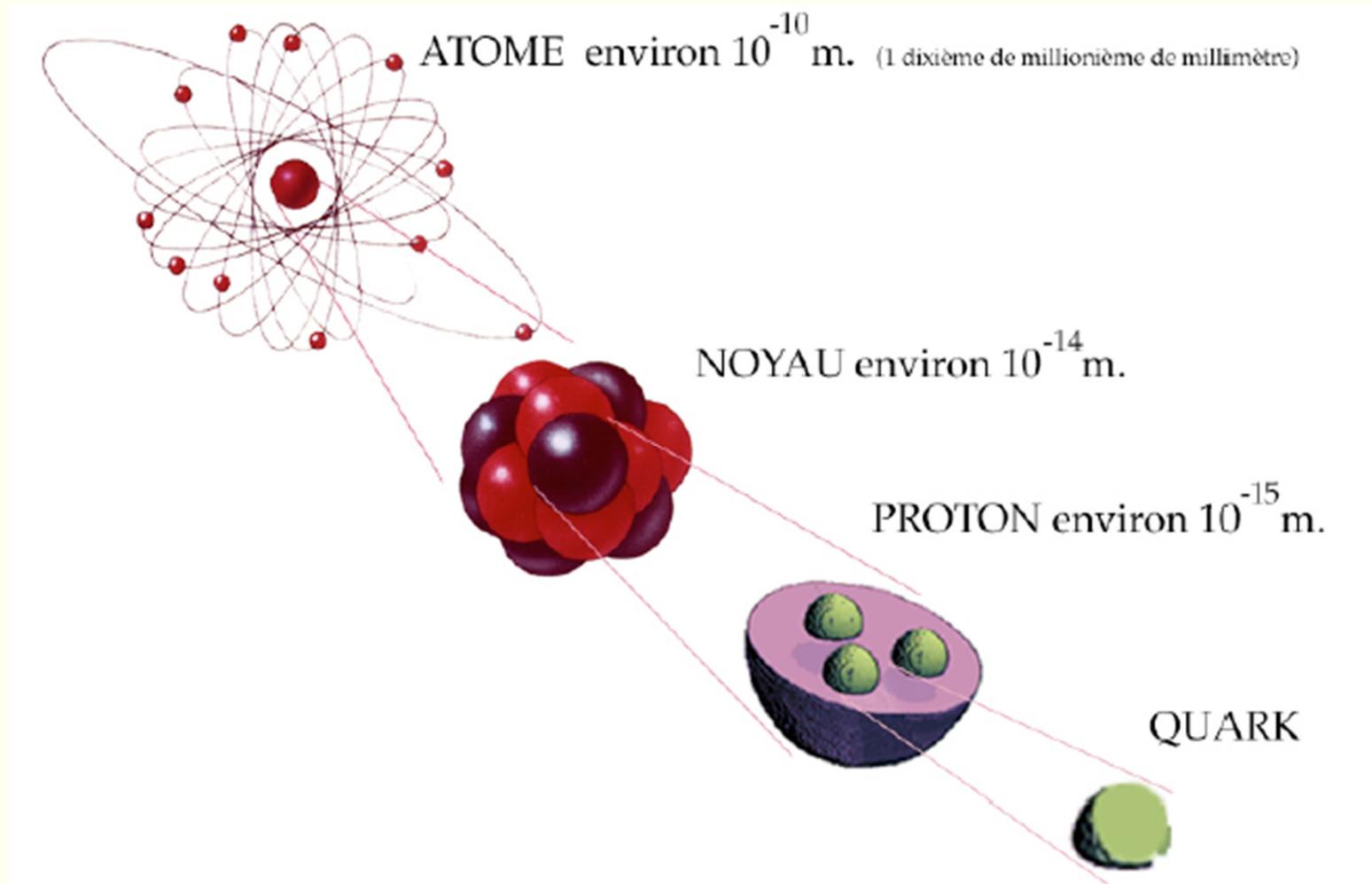


...consente di capire  
l'origine dell'Universo che  
ci circonda e di  
studiarne l'evoluzione

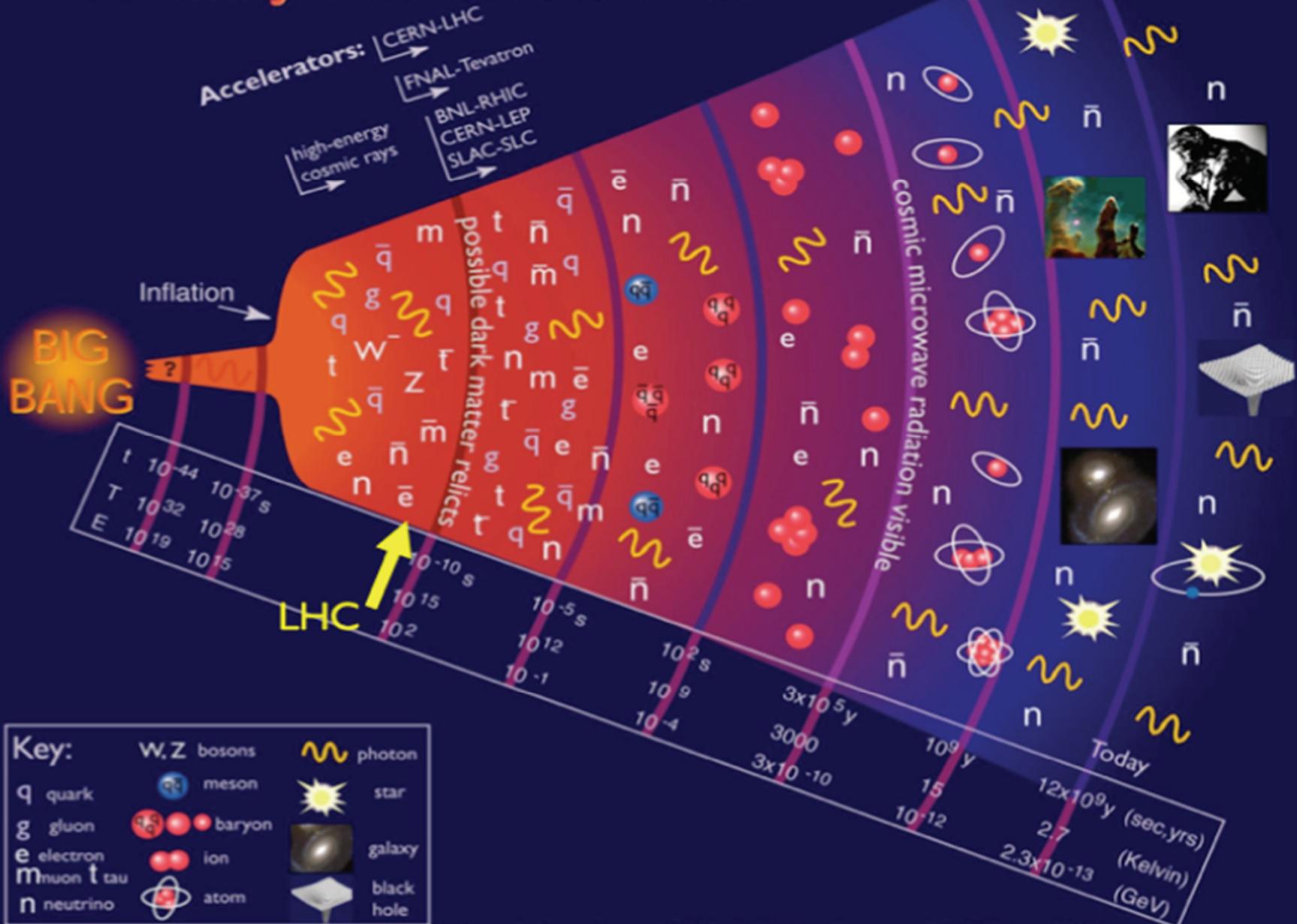


...fornisce  
informazioni sui  
costituenti ultimi del  
nostro universo e  
sulle leggi che li  
governano

# Costituenti fondamentali della materia

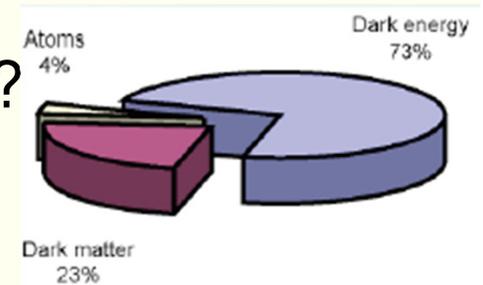


# History of the Universe

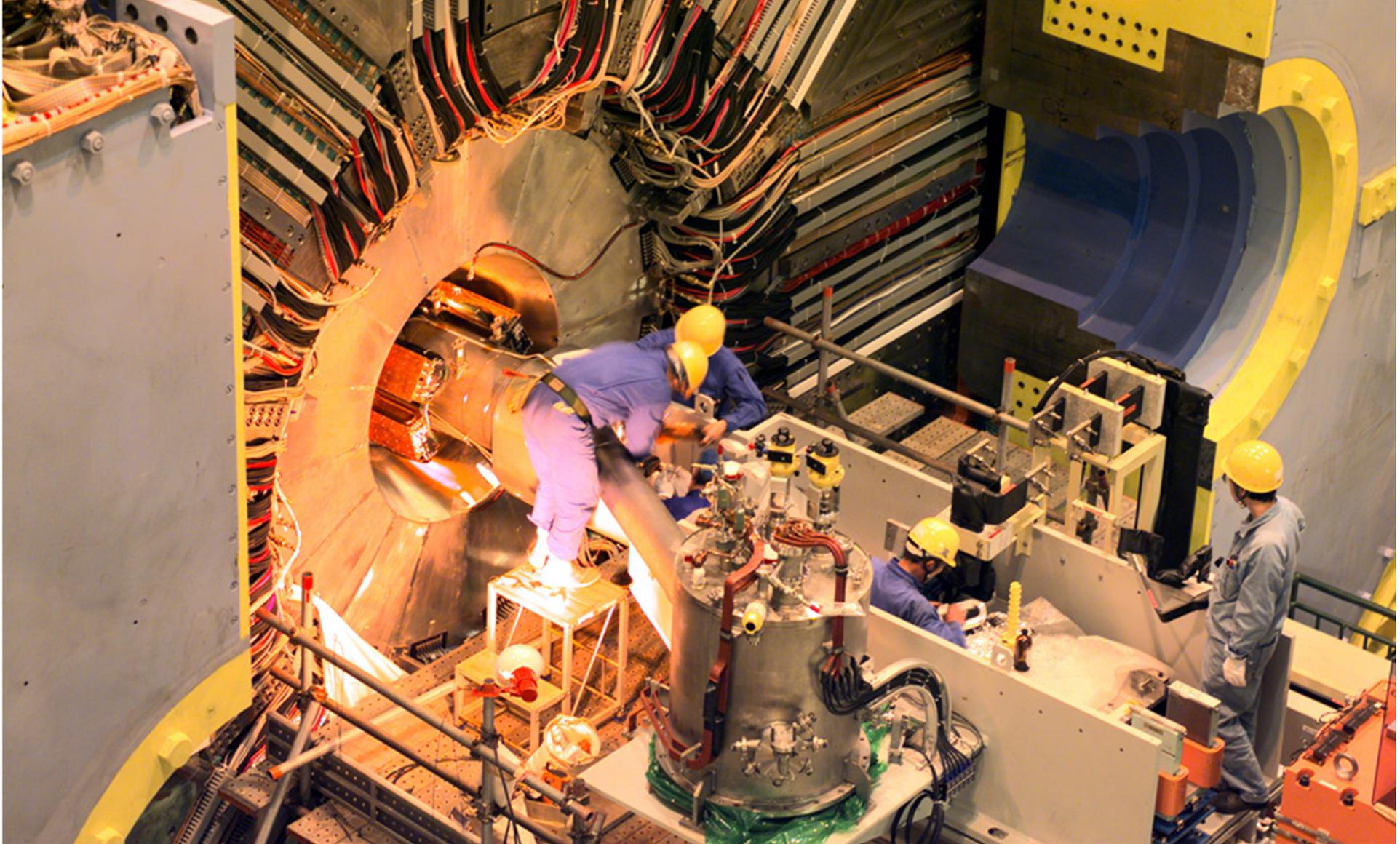


# Questioni aperte

- Perché tante particelle?
- Perché diverse forze?
- La massa, cos'è e da dove viene?  
Perché ogni particella ha la massa che ha?
- La materia è stabile?
- Il mondo è simmetrico?
- Cos'è la materia oscura? E l'energia oscura?
- Dov'è finita l'antimateria?
- Com'è legata alle altre forze la gravità?



Oggi gli acceleratori sono macchine sofisticatissime...  
Finchè rimangono questione aperte di fisica fondamentale, ci  
sarà ricerca anche nel campo della fisica e tecnologia per  
produrre acceleratori sempre più avanzati



## In sintesi:

L'acceleratore è una macchina che  
*accelera* particelle elementari  
allo scopo di investigare i costituenti ultimi  
della materia

Di seguito si illustrano i principi fisici su cui è basata,  
limiti e prospettive di acceleratori esistenti e futuri

## Parte I: come si accelera un particella carica

- accelerazione di particelle cariche per la legge  $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$  implica che ci sia una forza.
- La forza che agisce su una carica elettrica  $q$  è  $\mathbf{F} = q\mathbf{E}$
- Tuttavia, la legge  $\mathbf{F}=m\mathbf{a}$  vale solo per velocità piccole rispetto alla velocità della luce ( $v \ll c$ ), cinematica classica noi dobbiamo scrivere la legge valida sempre, anche per velocità relativistiche e ultra-relativistiche ( $v \approx c$ ) :

$$\mathbf{F} = d\mathbf{p}/dt = d(m\mathbf{v})/dt = m d\mathbf{v}/dt + \mathbf{v} dm/dt$$

Limite classico  $dm/dt \approx 0$

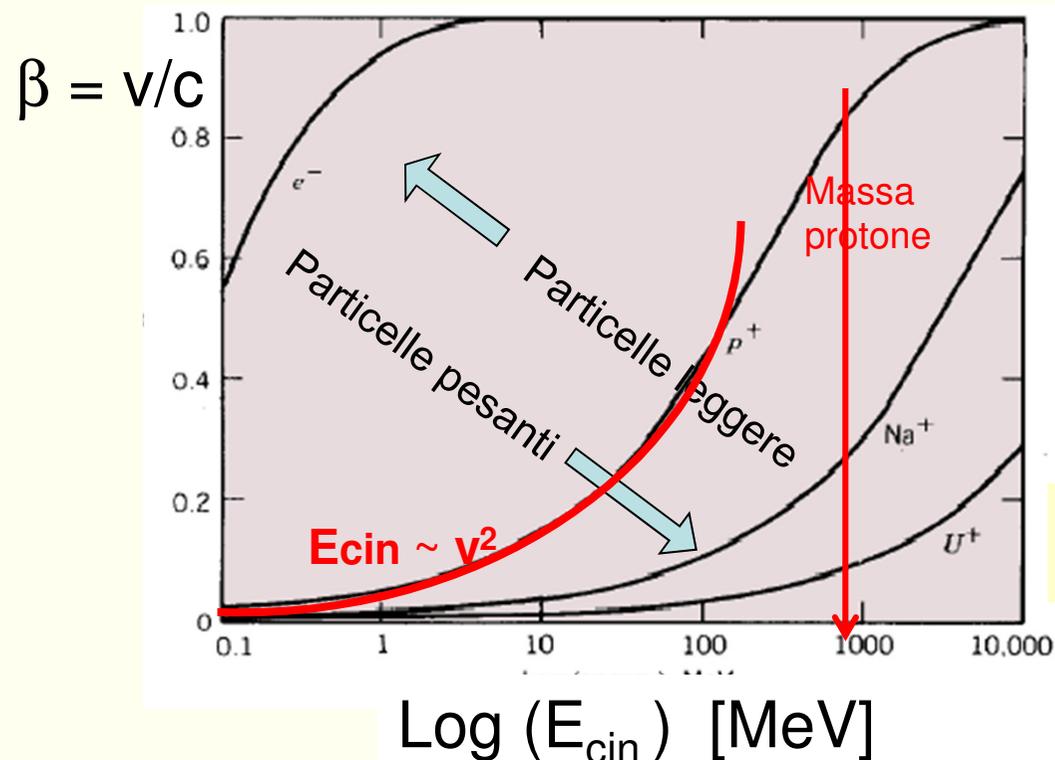
Limite ultrarelativistico  $d\mathbf{v}/dt \approx 0$

# Accelerazione come aumento di energia

Quando la relazione tra energia e velocità non è più quadratica accelerare una particella significa soprattutto aumentarne l'energia.

La variazione di velocità è trascurabile al di sopra di una certa energia cinetica, ad un aumento di  $E_{cin}$  corrisponde solo un aumento di massa relativistica

Velocità delle particelle  $v$  normalizzata a  $c$  in funzione dell'energia



$$E = \gamma m_0 c^2 = \sqrt{(pc)^2 + (m_0 c^2)^2}$$

# Definizioni di cinematica relativistica

Energia di una particella a riposo  $E_0 = m_0 c^2$

Energia totale di una particella in moto (definizione di  $\gamma$ )

$$E = \gamma E_0 = m_0 c^2 \gamma$$

$$E = E_0 + E_{\text{cin}}$$
$$p^2 c^2 = E^2 - E_0^2$$

Un'altra variabile relativistica è definita:  $\gamma = E/E_0$

$$\beta = \frac{\text{momento} \times c}{\text{energia}} = \frac{pc}{E} = \frac{v}{c}$$

Potete dimostrare che:  $pc = \beta E = m_0 c^2 (\beta \gamma)$

**Energie (impulsi) sono classificati come segue:**

$\gamma \sim 1$

**non relativistico**

$\gamma > 1$

**relativistico**

$\gamma \gg 1$

**ultrarelativistico (in questo caso  $E_{\text{cinetica}} \sim E$ )**

# Commenti: cinematica relativistica

- Per piccoli valori di  $\beta$  ( $v \ll c$ ) valgono le regole della meccanica classica ( $E = mv^2/2$ ), mentre sono sempre valide quelle relativistiche ( $E = \gamma m_0 c^2$ )
- In particolare, quando  $v$  si avvicina a  $c$  ogni forma di accelerazione (fornitura di energia alla particella) si traduce in un aumento di massa relativistica, con un piccolissimo aumento della velocità
- La condizione  $\beta = 0.99$  si ottiene per un energia di un elettrone di 3.6 MeV, mentre ciò vale per un protone da 6651.2 MeV

e<sup>-</sup> relativistici a  $E > 1 \text{ MeV}$

p relativistici a  $E > 1000 \text{ MeV}$



# Dimensioni in gioco

## ■ Masse

- Elettrone (e) ~ 0.5 MeV
- Muone ( $\mu$ ) ~105 MeV
- Pione ( $\pi$ ) ~140 MeV
- Protone e neutrone (p,n) ~938 MeV
- Fotone e neutrino( $\gamma,\nu$ ) ~0. MeV

## ■ Lunghezze

- 1  $\mu\text{m}$  ( $10^{-6}$  m) -risoluzione spaziale degli apparati
- 1 nm ( $10^{-9}$  m) -lunghezza d'onda del verde (~500nm)
- 1 Å ( $10^{-10}$  m) - dimensioni dell'atomo
- 1 f ( $10^{-15}$  m) -dimensioni del nucleo

## ■ Tempi

- 1  $\mu\text{s}$  ( $10^{-6}$  s) deriva di 5 cm di un e in un gas (camere a a deriva)
- 1 ns ( $10^{-9}$  s) un fotone fa 30 cm in 1 ns (nel vuoto)
- 1 ps ( $10^{-12}$  s) vita media di un mesone B

## Parte I: come si accelera una particella carica

Per portare particelle cariche ad alta energia, cioè per *accelerarle* tanto, il campo elettrico  $\mathbf{E}$  che agisce su di esse deve essere molto grande ed agire per tanto spazio, per fare tanto lavoro:

Energia – Lavoro – forza  $\times$  spostamento

$$E_{\text{cinetica}} = L = \int \mathbf{F} \cdot d\mathbf{s}$$

semplificando, per fissare le idee:

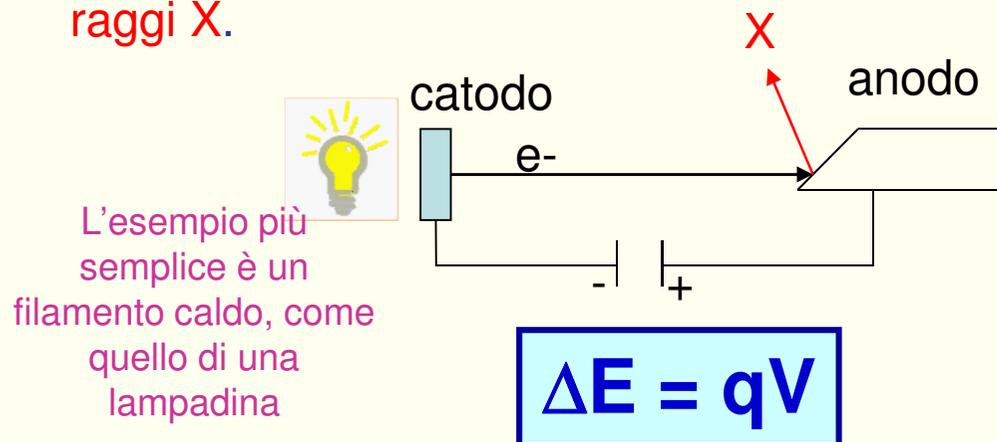
$$\Delta E_{\text{cinetica}} = q E \Delta z$$

Naturalmente la particella deve viaggiare nel vuoto assoluto altrimenti sarebbe frenata dagli urti con le molecole nell'aria

Primo schema acceleratore: un tubo di materiale isolante in cui è stato fatto il vuoto ed in testa un elettrodo ad alta tensione

# Acceleratori 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 emetteva elettroni che fluivano accelerati dal campo elettrico verso l'anodo (a tensione positiva) sul quale urtavano producendo **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

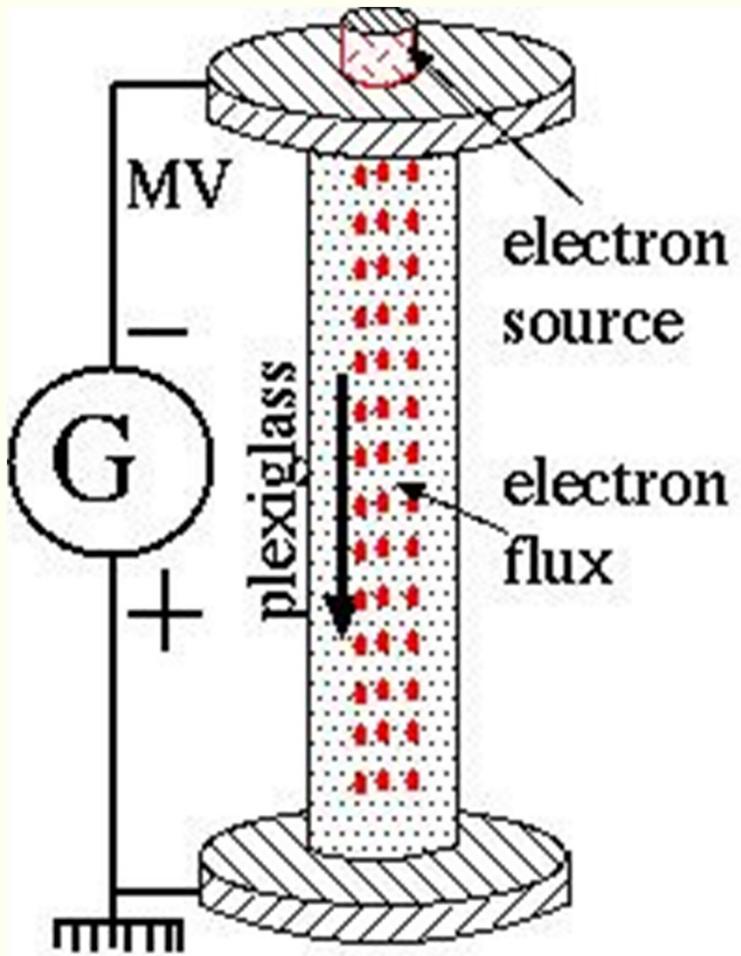
## PRINCIPIO:

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



L'energia massima raggiungibile è data dal limite di d.d.potenziale oltre cui avvengono scariche elettriche

# Acceleratore elettrostatico



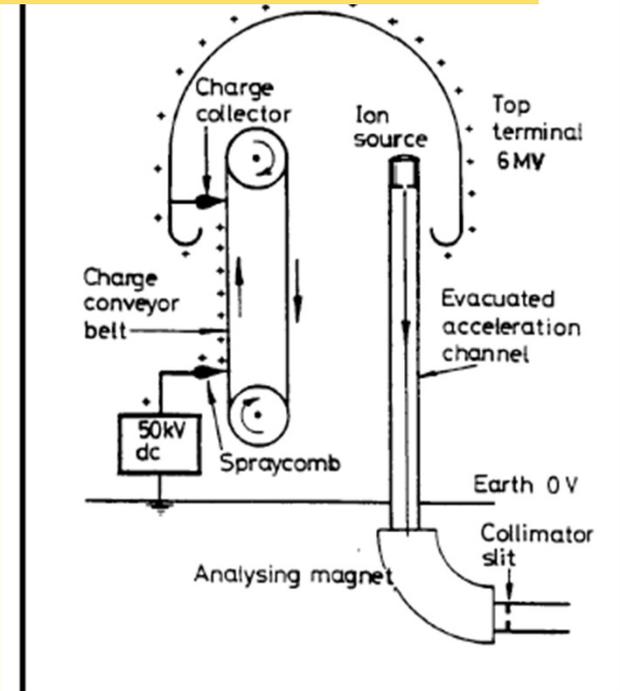
C'è stato bisogno di un'innovazione tecnologica: i generatori di **alta** tensione:

- Generatore elettrostatico
- Cockroft Walton

# Generatore elettrostatico di Van der Graaf

Per aumentare l'energia massima delle particelle accelerate Van de Graaff pensò realizzare un **generatore elettrostatico** nel quale le cariche, per mezzo di una cinghia non conduttrice, venivano trasportate ad un terminale isolato nel quale veniva posta la sorgente di particelle.

Pressurizzando il contenitore dell'acceleratore si possono ottenere differenze di potenziale fino a  $V \sim 10 \text{ MV}$  e quindi energie fino a  $E \sim 10 \text{ MeV}$ .



## APPLICAZIONI

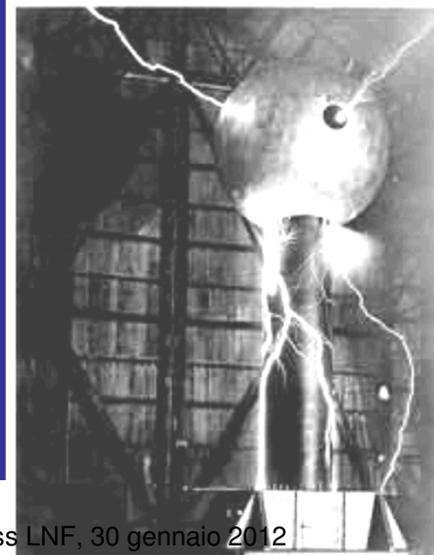
Ad oggi ce ne sono ~350 nel mondo e, tipicamente,  $V < 5 \text{ MV}$   $I < 100 \mu\text{A}$ . Sono usati per:

**Analisi dei materiali:**

*ad es. Controllo struttura semiconduttori;  
emissione raggi X;*

**Modifica dei materiali:**

*impiantazione ionica per l'industria dei  
semiconduttori*



Naturalmente gli elettroni o protoni o ioni bisogna generarli

A questo punto sappiamo che un acceleratore ha i seguenti componenti

- sorgente di particelle
- Sistema da vuoto
- Generatore di tensione

# Sorgente di particelle da accelerare

## Cannone di elettroni

i principi di emissione possono essere, per es.:

- **elettrostatico termoionico**

un catodo caldo viene scaldato per creare un flusso di elettroni mediante emissione termoionica, poi degli elettrodi generano un campo elettrico per l'accelerazione e il trasporto del fascio

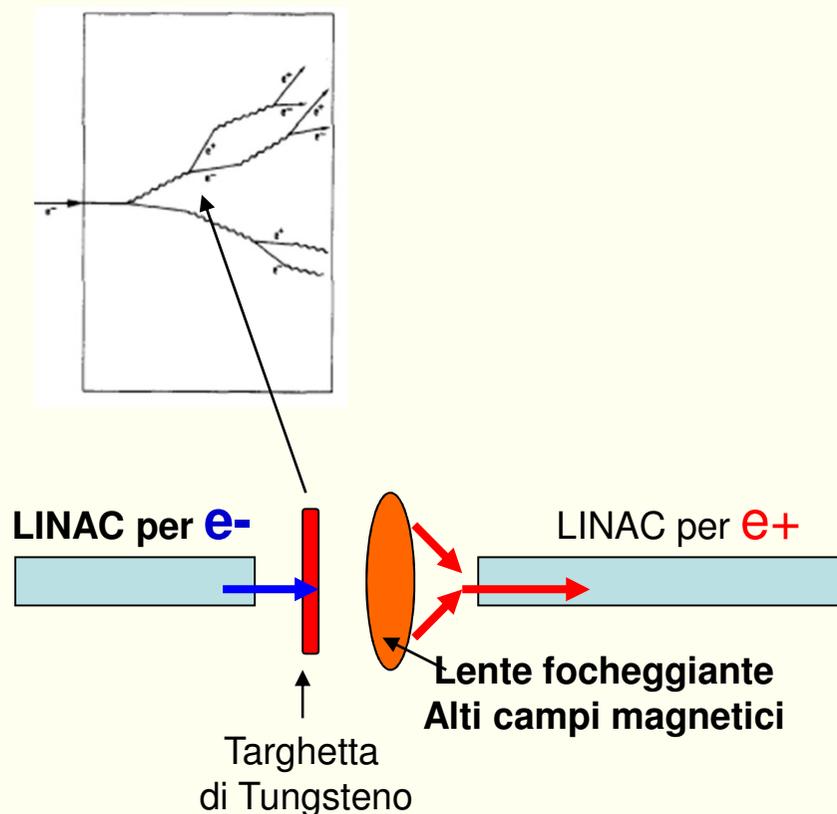
- **fotocatodo:** viene illuminato da un fascio laser che induce l'emissione di elettroni per effetto fotoelettrico. Tale catodo è posto nella regione di massima intensità del campo elettrico del cannone rf, in modo che gli elettroni emessi vengano subito accelerati per formare un fascio denso e focalizzato.

# Cannone di positroni $e^+$ : Dove si prende l'antimateria?

L'universo, il nostro mondo sono formati da materia: elettroni, protoni, neutroni,...

I **positroni**, predetti nel 1927 dal matematico Dirac, misurati qualche anno dopo in un esperimento con raggi cosmici (Andersen), adesso si producono in laboratorio.

(Così anche gli **antiprotoni**, l'antimateria dei protoni, anche se la loro produzione e manipolazione è più complessa)



Sorgente di positroni di DAΦNE

# Cavità a radio-frequenza

- Serviva un'idea nuova  
per superare il limite delle decine di MeV di energia  
dovuto alle scariche elettriche
- L'idea nuova è quella di usare campi elettrici sinusoidali  
nel tempo  $E=E_0 e^{i\omega t}$ , dentro una cavità risonante



cavità a radiofrequenza di ILC (International Linear Collider)  
accelerano circa 35 MV/m,  
Cioè gli e- viaggiando nelle cavità acquistano 35 MeV in 1m

# I diversi tipi di acceleratori si suddividono in base al processo di accelerazione:

## 1. acceleratori elettrostatici: $E = \text{const.}$ , Principio: $\Delta E = q(V_2 - V_1)$

- Van der Graaf  $E \approx 10 \text{ MeV}$
- Tandem  $E \approx 25 \text{ MeV}$

## 2. acceleratori a radio frequenza $E = E_0 e^{i\omega t}$ , Principio: accelerazione a RF

- acceleratori **lineari**
- acceleratori **circolari** (accelerazione RF + magneti curvanti)

## 3. acceleratori a induzione

- betatrone  $E < \sim 300 \text{ MeV, e-}$

$$\text{rot}\vec{E} = -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t}$$

campo elettrico accelerante  
prodotto dalla variazione di  
flusso magnetico

# Accelerazione con campi elettrici sinusoidali

$$E = E_0 e^{i\omega t}$$

## ■ acceleratori lineari

- |                        |      |   |        |
|------------------------|------|---|--------|
| ■ Wideroe              | 1927 | $E \approx 1 \text{ MeV}$ , ioni pesanti  | 7MHz   |
| ■ Alvarez              | 1945 | $E \approx 50\text{-}200 \text{ MeV}$ , p | 200MHz |
| ■ Traveling Wave tube  | 1989 | $E = 50 \text{ GeV}$ (SLC)                | 3GHz   |
| ■ Stationary Wave Tube |      |   |        |

## ■ acceleratori circolari

- |                        |      |   |  |
|------------------------|------|---|--|
| ■ Ciclotrone classico  | 1930 | $E \approx 30 \text{ MeV}$ , p            |  |
| ■ Sincrociclotrone     | 1946 | $E \approx 800 \text{ MeV}$ , p           |  |
| ■ Sincrotrone          | 1950 | $E \approx \text{GeV}$ (fascio-targhetta) |  |
| ■ Single Ring Collider | 1962 | $E = 250 \text{ MeV}$ (AdA)               |  |
| ■ Double Ring Collider | 1963 | $E = 500 \text{ MeV}$ (SLAC, Novosibirsk) |  |

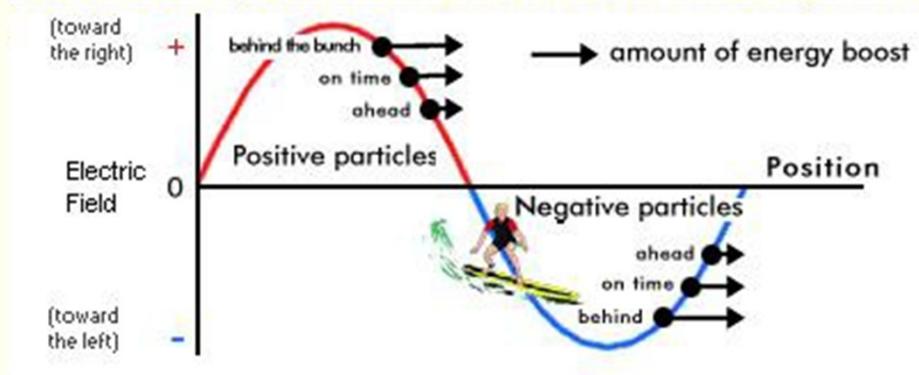
La nuova idea delle cavità RF è stata applicata parallelamente agli acceleratori lineari e circolari

# Stabilità di Fase

L'idea di Wideroe fu quella di applicare, invece di un campo elettrico statico, un campo oscillante con frequenza opportuna tale che la fase cambi di  $\pi$  durante il tempo di volo tra due gap successive.

Il gran vantaggio fu quello di introdurre il principio di stabilità di fase: se il campo accelerante è una sinusoide e le particelle passano sulla parte crescente dell'onda, la particella che arriva in anticipo di fase rispetto alla fase sincrona verrà accelerata di meno, quella in ritardo vedrà un campo maggiore.

Le particelle oscilleranno quindi attorno alla fase della particella sincrona.

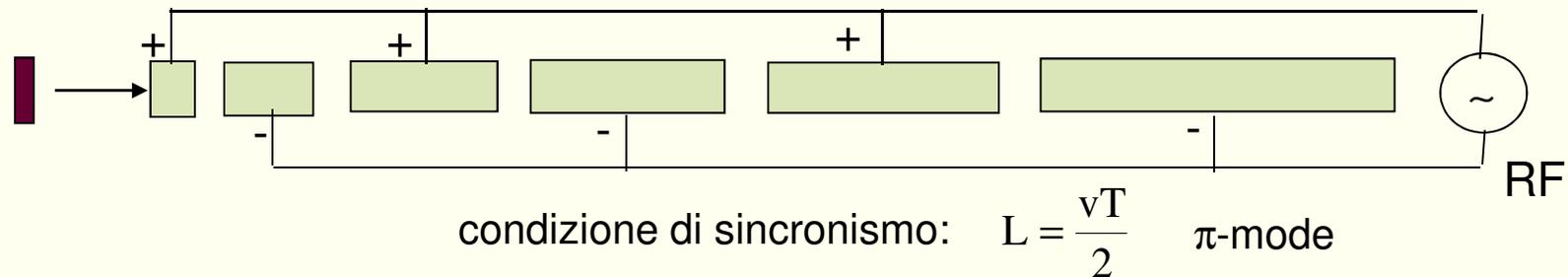


Pacchetti di elettroni sono accelerati in modo molto simile a come un *surfer* è spinto da un' onda.



# Wideroe- Acceleratori Lineari con campo elettrico RF

- Le particelle emesse dal filamento vengono accelerate dal campo elettrico longitudinale generato da elettrodi susseguenti.
- Questa idea di **Ising (1924)** fu applicata da **Wideroe (1927)** che applicò una tensione variabile nel tempo (sinusoidale) ad una sequenza di tubi di drift, realizzando così il primo *Drift Tube Linac*.
- In questo caso le particelle non sentono campo accelerante quando si muovono all'interno di ciascun tubo di drift (regione di spazio equipotenziale) e vengono accelerate in corrispondenza dei *gaps*. Tali strutture si chiamano LINAC a Tubi di Drift.

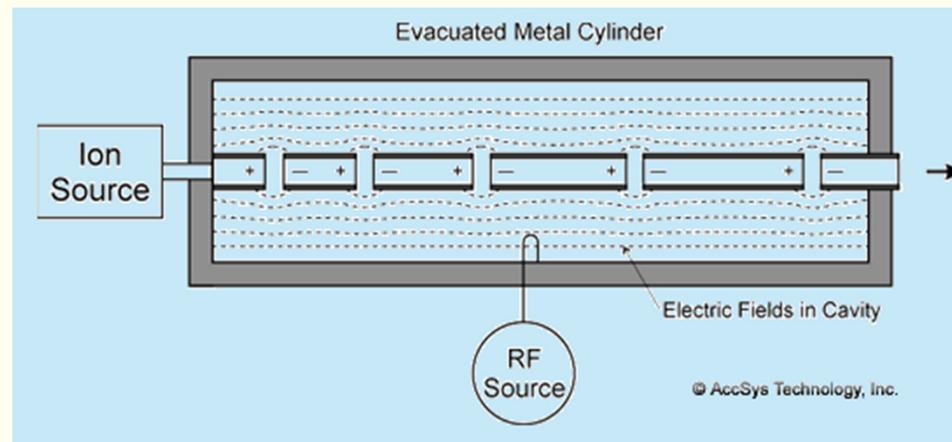


Per accelerare ad energie sempre maggiori le particelle è necessario allungare sempre più i drift tubes, fino ad un limite massimo possibile.

# Cavità a radiofrequenza

Per andare a energie più elevate occorre aumentare la frequenza del campo elettrico.

Dopo la seconda guerra mondiale, con lo sviluppo dei radar, sono stati inventati dei generatori di potenza ad alta frequenza, fino ai GHz



Le cavitá risonanti sono delle scatole metalliche alimentate da generatori di “onde elettromagnetiche di alta frequenza, GHz

# Fasce di particelle cariche

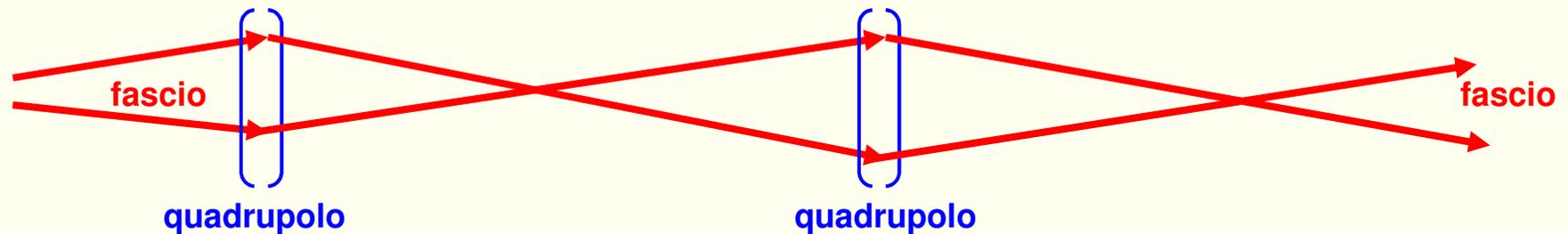
Abbiamo visto come si accelerano le particelle  
Vogliamo produrre **fasce intensi**, costituiti da tanti **pacchetti** (per il principio di stabilità di fase)

Tipicamente, l'ordine di grandezza dei pacchetti è  
Carica  $\sim 1$  nC hanno circa  $10^{10}$  elettroni in  $\sim 1$  mm<sup>2</sup>,

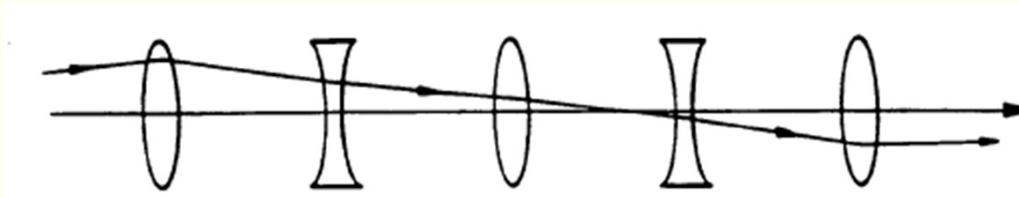
la forza di repulsione elettrostatica è grandissima anche se molto ridotta per effetto relativistico

Lungo l'acceleratore si mettono delle forze focheggianti per tenere impacchettato il fascio

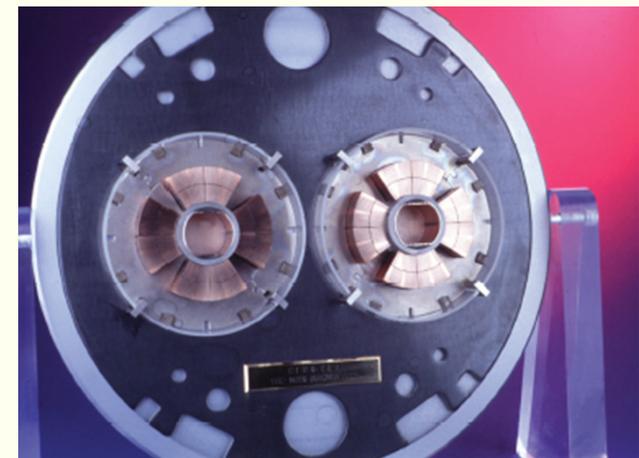
# Magnete Quadrupolo focalizza i fasci di particelle



- Un sistema di lenti ottiche trasporta un fascio luminoso.
- Un sistema di quadrupoli trasporta una fascio di particelle cariche.
- Lenti ottiche e quadrupoli controllano i due tipi di fasci evitandone la divergenza



Un quadrupolo magnetico e' analogo ad una lente ottica, agisce con una forza lineare.



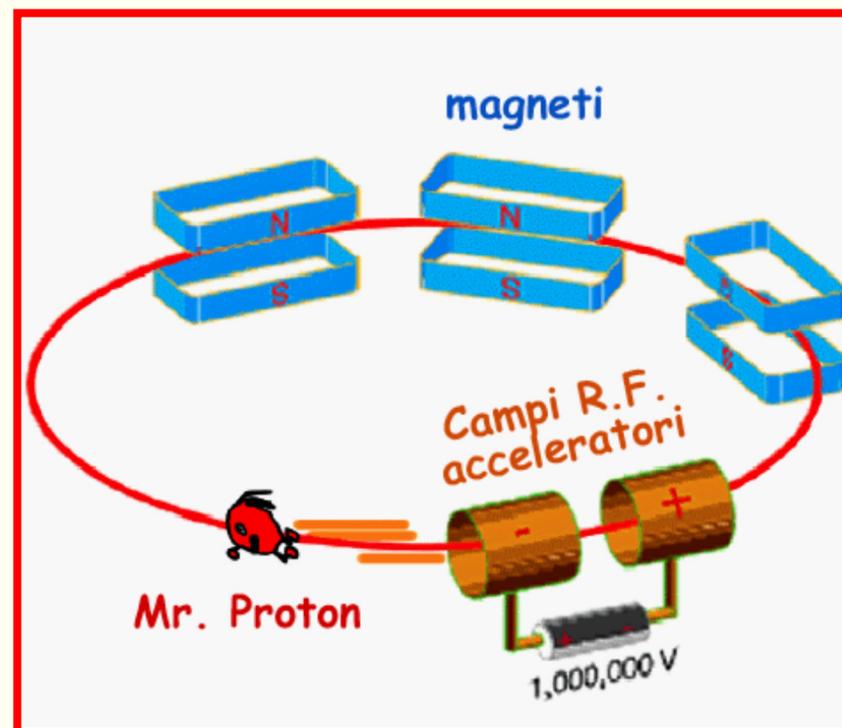
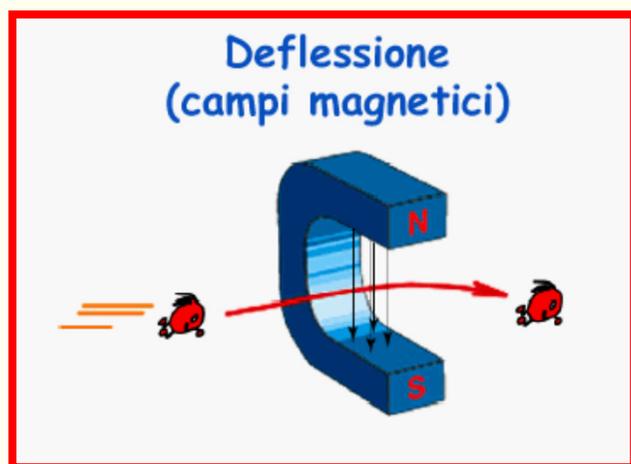
# Schema acceleratore sino qui

1. **Sorgente pulsata** di elettroni, oggi “cannoni a radiofrequenza comadati da laser per emissione di elettroni secondo l’effetto fotoelettrico”
2. **Sistema da altissimo vuoto**: pompe rotative, turboioniche e a diffusione
3. **Cavità risonanti ad alta frequenza**
4. **Sistemi focheggianti dei fasci di particelle**

# Gli Acceleratori Circolari

L'idea successiva e' stata quella di utilizzare la stessa cavità facendo ripassare la particella n-volte attraverso essa, come in figura

E.O. Lawrence ebbe la brillante idea di curvare le particelle su una traiettoria circolare, facendole ripassare molte volte nello stesso sistema di elettrodi.



Far fare alla particella un percorso circolare perchè ripassi sempre attraverso la cavita' accelerante

Quindi bisogna aggiungere una forza centripeta per avere il moto circolare

In elettromagnetismo sappiamo generare in modo naturale la forza centripeta

$$\mathbf{F}(\text{centripeta}) = q \mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

Da questa idea sono nati i sincrotroni e gli anelli di accumulazione

Il primo anello di accumulazione ADA a Frascati da Touschek

# Sincrotroni e Anelli di Accumulazione

**PRINCIPIO: Campi magnetici usati per guidare le particelle cariche lungo un'orbita chiusa.**

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

Se una particella relativistica di energia  $E_0$  attraversa una zona di campo magnetico  $B$  perpendicolare alla sua traiettoria il raggio di curvatura  $R$  è:

$$R \propto \frac{E_0}{B}$$

## NOTA IMPORTANTE

Le particelle cariche nella traiettoria circolare emettono radiazione a causa dell'accelerazione centripeta, la **RADIAZIONE DI SINCROTRONE**,

Negli acceleratori circolari le cavità acceleranti devono integrare quell'energia

In queste macchine e' stata applicata l'idea di  
**immagazzinare**  
particelle accelerate

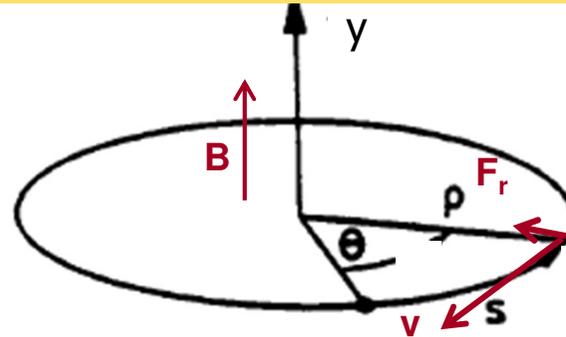
Il LINAC genera ed accelera le particelle

L'acceleratore circolare le conserva circolanti ad energia fissata uguagliando il guadagno di energia per giro con la perdita per luce di sincrotrone per giro

I LINAC vengono usati come iniettori degli acceleratori circolari, per mettere con continuita' pacchetti nell'anello in risonanza con la frequenza della cavita' risonante

# Particella carica in equilibrio su traiettoria circolare

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = q (\cancel{\vec{E}} + \vec{v} \times \vec{B})$$



$$qv_{\theta} B_y = \frac{mv_{\theta}^2}{\rho}$$

La particella si muove sull'orbita circolare di raggio  $\rho$  quando la forza di Lorentz bilancia quella centrifuga

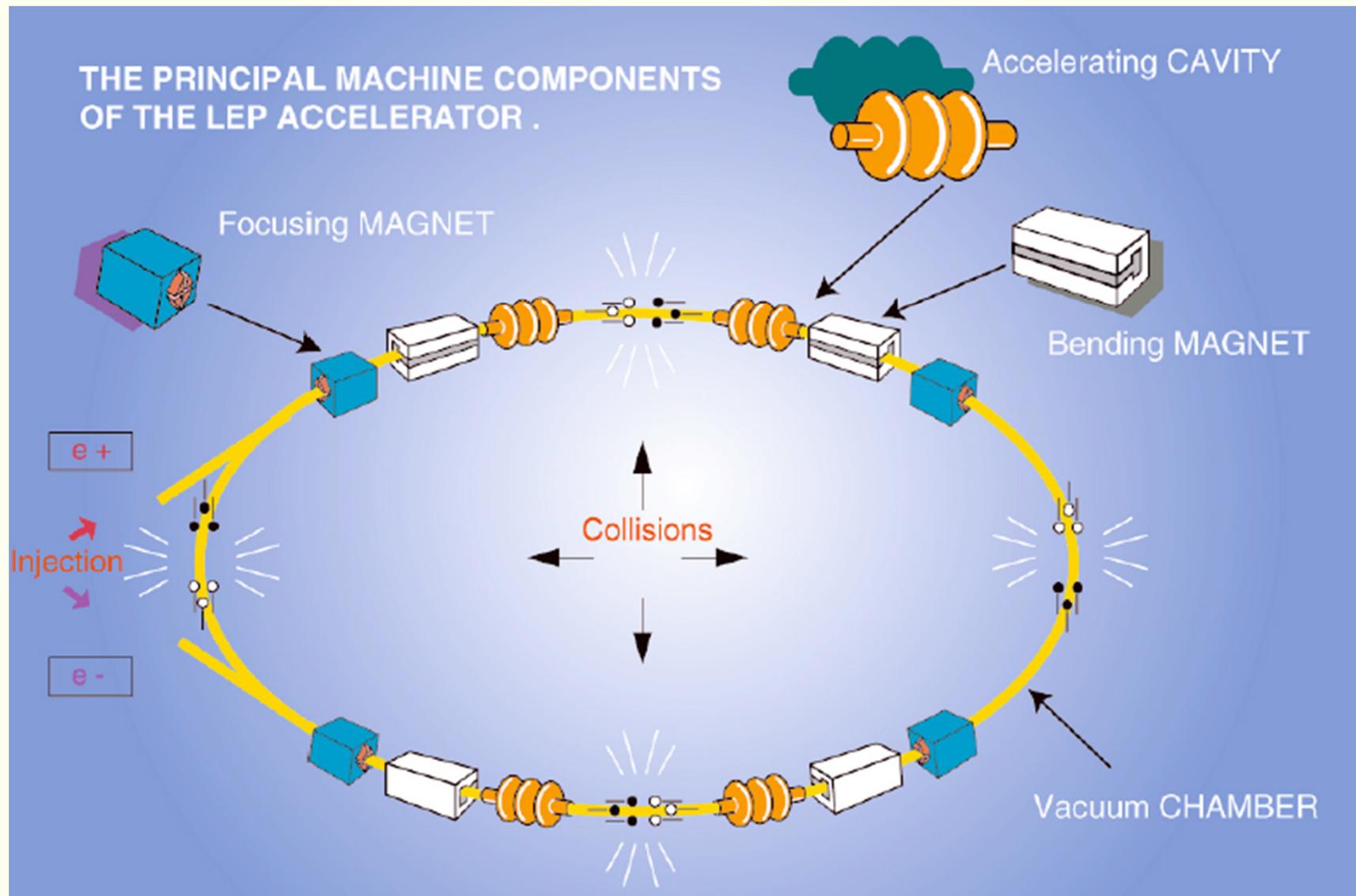
$$\rho = \frac{\gamma m_0 v}{qB} = \frac{p}{qB}$$

$$\rightarrow B \propto \frac{E}{\rho}$$

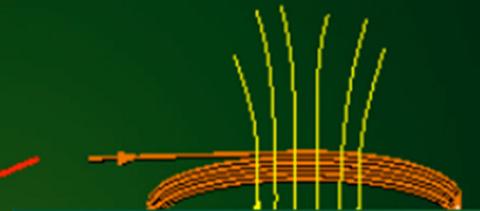
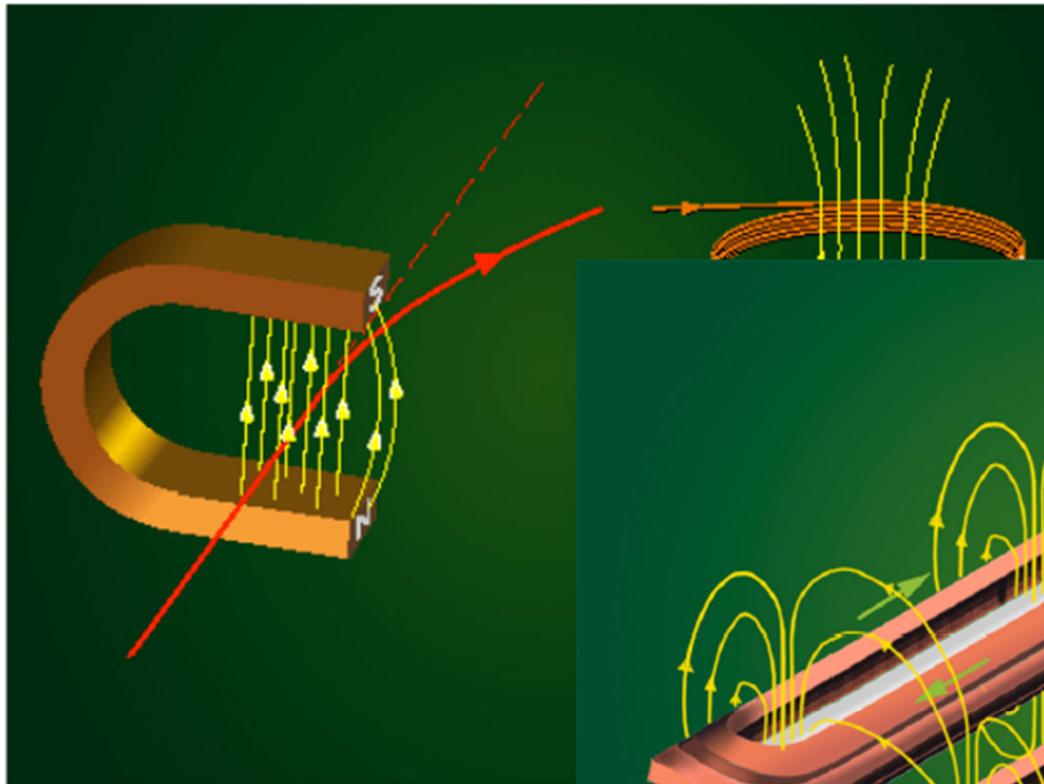
$$B(\text{T})\rho(\text{m}) = 3.3 p(\text{GeV}/c)$$

Rigidità magnetica

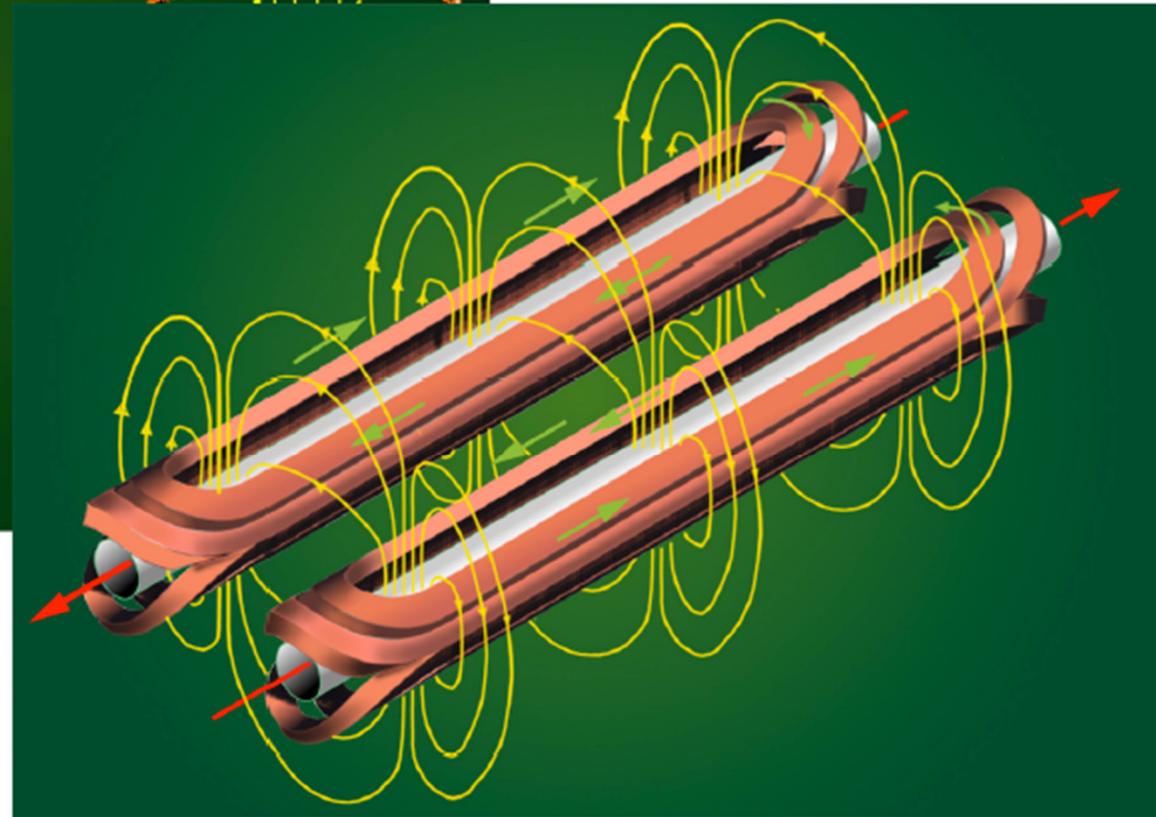
# Componenti principali di un Acceleratore



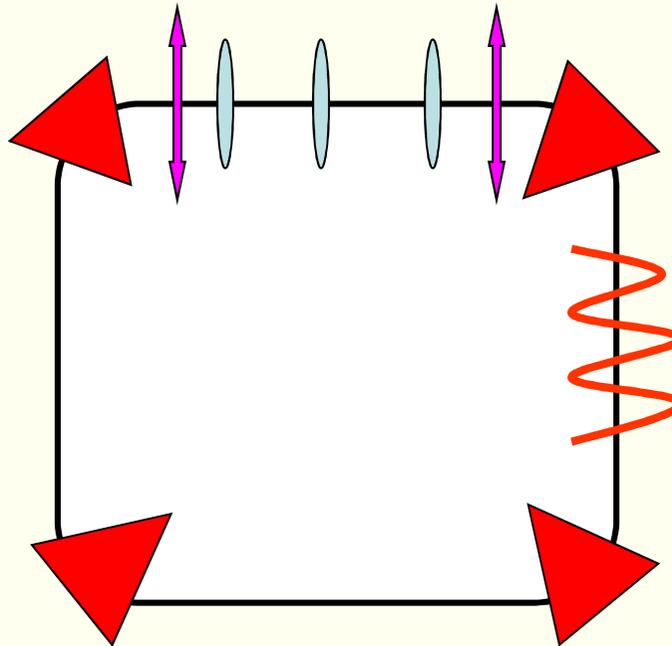
# Magnete Dipolo per curvare la traiettoria



Dipolo di LHC



## Principali magneti di un anello



**DIPOLI** – determinano la traiettoria di riferimento

**QUADRUPOLI** – mantengono le oscillazioni di tutte le particelle  
intorno alla traiettoria di riferimento

**SESTUPOLI** – correggono l'effetto cromatico dei quadrupoli

**WIGGLERS** – aumentano l'emissione di luce di sincrotrone

# Le proprietà che caratterizzano un fascio di particelle in un acceleratore

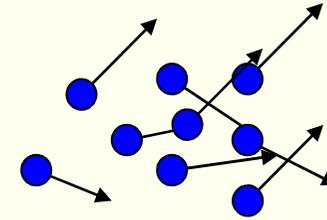
- Energia e distribuzione di energia
- Emittanza: *prodotto della dimensione trasversale per la divergenza angolare o meglio area nello spazio delle fasi che racchiude la distribuzione di particelle.*
- Corrente media e di picco.
- Struttura temporale dei pacchetti di particelle.

## Gli acceleratori di particelle dedicati alla fisica delle alte energie si distinguono per:

- Tipo di particelle accelerate: protoni, elettroni, ioni. Con gli adroni si possono raggiungere energie nel centro di massa più elevate, ma con i leptoni gli esperimenti risultano più facili da interpretare.
- Energia massima raggiungibile: questi acceleratori si usano per investigare le zone di energia sempre più elevate e scoprire nuove particelle.
- Luminosità massima per effettuare esperimenti ad alta statistica in cui è necessaria un'elevata produzione di particelle di determinata energia.

# Spazio delle fasi delle particelle

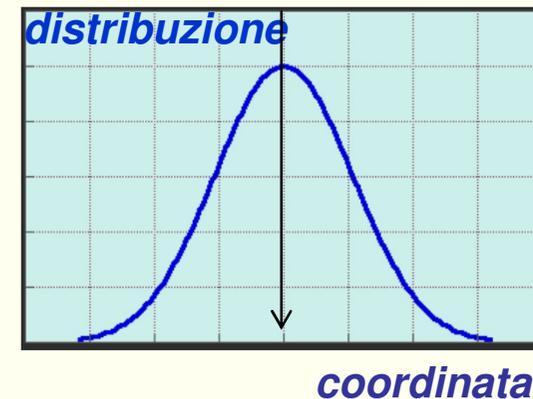
Le particelle di un fascio in un acceleratore non hanno tutte la stessa energia, posizione, divergenza



Direzione di propagazione del fascio  $s$



energia, posizione e divergenza hanno distribuzioni gaussiane

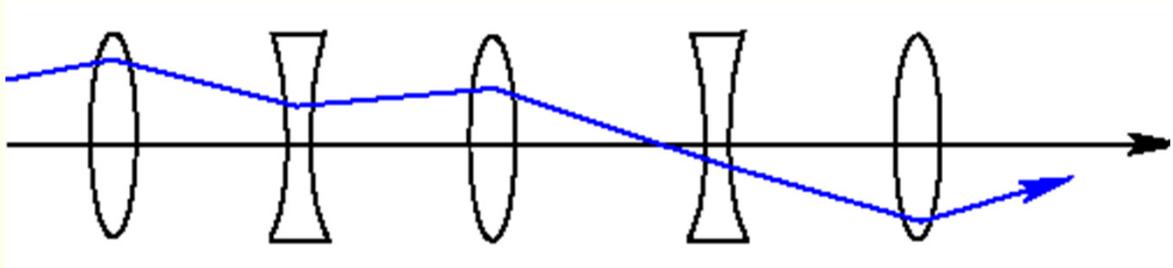


Il **pacchetto** di particelle è una gaussiana a 6 dimensioni nello spazio fisico e delle velocità ( $x, x', y, y', s, E$ )

L'area occupata dalle particelle nello spazio delle fasi è detta **EMITTANZA**

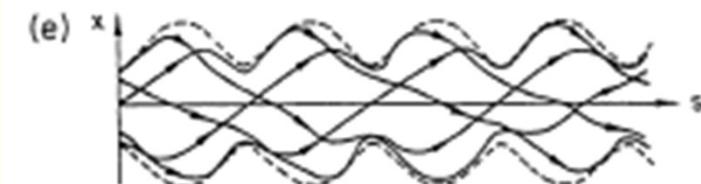
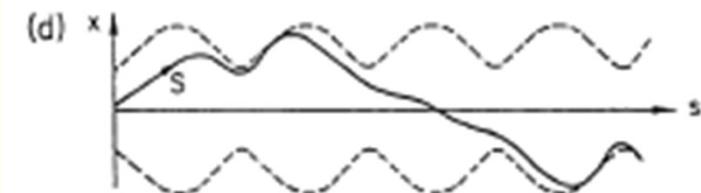
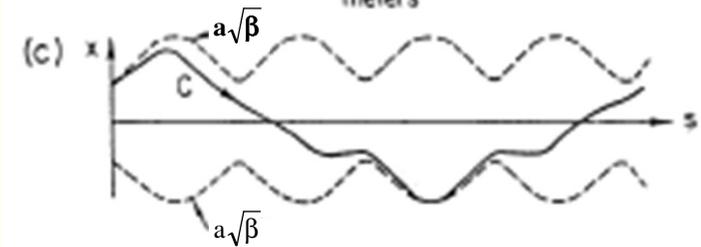
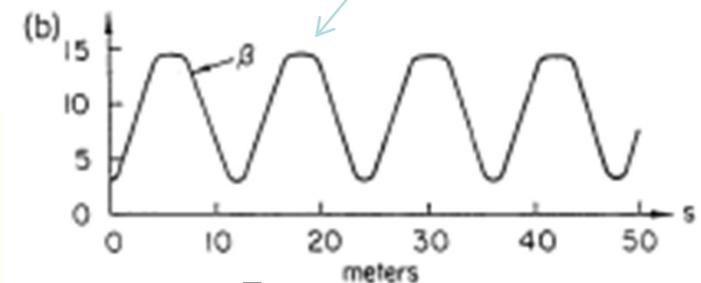
Un fascio a bassa emittanza occupa uno spazio piccolo nelle 3D e ha anche piccole velocità trasverse

La traiettoria trasversa descritta da ogni particella all'interno del pacchetto è una pseudo-sinusoide.



L'inviluppo è caratterizzato da un parametro: **funzione  $\beta$**

Tutte le traiettorie sono confinate in un inviluppo, che determina la dimensione fisica del fascio



## Oscillazioni di betatrone

Una particella con energia nominale e con  $x = x' = y = y' = 0$  segue la traiettoria nominale e passa al centro dei quadrupoli dove il campo magnetico è nullo

Se la sua posizione cambia per qualche motivo, passa fuori asse nei quadrupoli e oscilla intorno alla traiettoria nominale:

Oscillazione di betatrone

L'area dell'ellisse che contiene tutte le particelle del fascio è

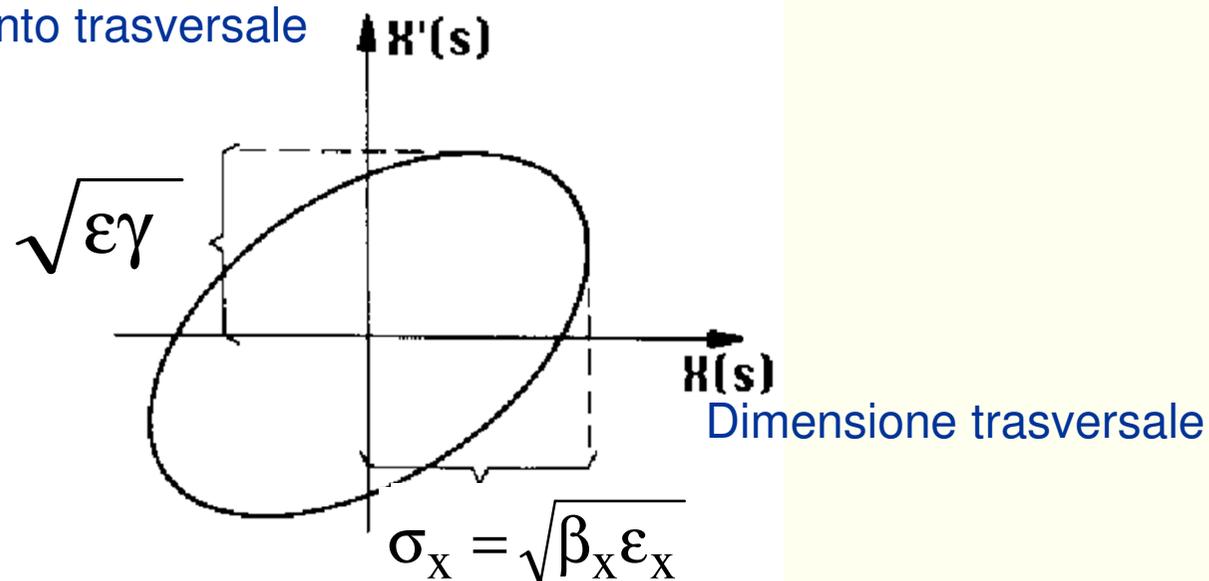
## EMITTANZA $\epsilon$

$$\gamma y^2 + 2\alpha y y' + \beta y'^2 = \text{area dell'ellisse} = \epsilon$$

$\alpha, \beta, \gamma$ , variano lungo  $s$ ; l'area dell'ellisse è invece costante

I parametri di Twiss  
definiscono la forma e  
l'inclinazione dell'ellisse  
nello spazio delle fasi.

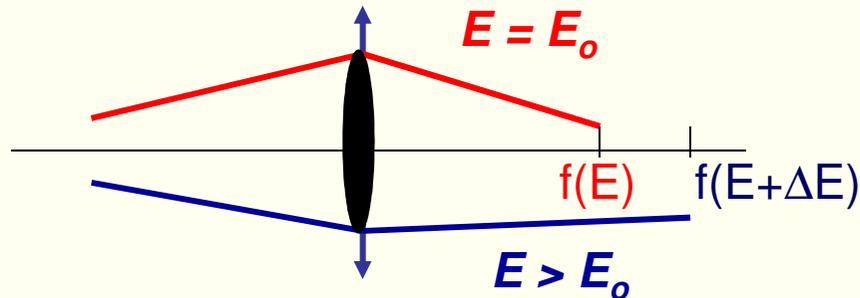
Momento trasversale



Se ci mettiamo in un punto della macchina di posizione longitudinale  $s$  ed osserviamo posizione ed angolo di una particella nei giri successivi, vedremo che i rispettivi  $X_i$  ed  $X'_i$  corrispondono sempre a punti sull'ellisse.

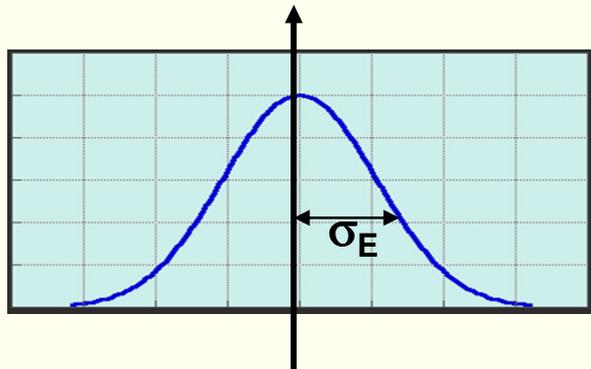
# Aberrazione cromatica in analogia all'ottica

L'effetto foccheggiante o defoccheggiante di un quadrupolo dipende dall'energia della particella



In un quadrupolo foccheggiante una particella più energetica è più rigida ( $B\rho = p/q$ ), è deviata meno

Il *tune* della particella con energia nominale è diverso dal *tune* di una particella con energia diversa

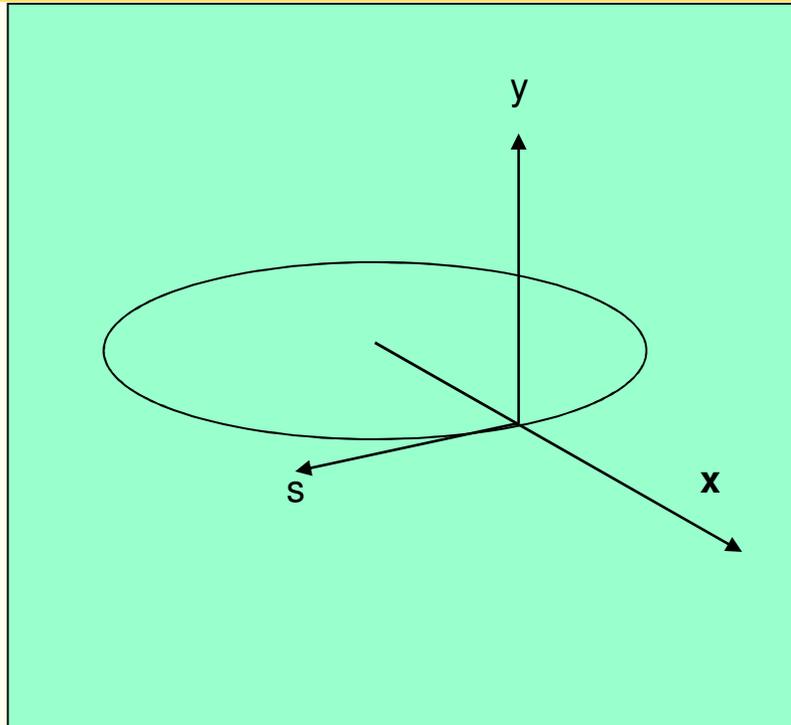


Il parametro con cui misuriamo e teniamo sotto controllo questo effetto è il cromatismo

$$C_{x,y} = \frac{\Delta Q_{x,y}}{\Delta E/E_0} = \text{cromatismo}$$

Il cromatismo naturale di un anello è dominato dal contributo dei quadrupoli foccheggianti, quindi è negativo. Gli acceleratori circolari lavorano con cromatismi  $\geq 0$

# Sistema di riferimento di una particella carica in moto in un acceleratore



**$x$  – orizzontale**

**$y$  – verticale**

**$s$  – longitudinale sulla traiettoria di riferimento**

# Calcolo matriciale per il trasporto dei fasci

Ogni particella rappresentata da un Vettore 6D

La particella si sposta lungo l'acceleratore modificando la sua posizione  $x, y, s$ , le sue velocità trasverse  $x', y'$  e la sua energia

Ogni elemento della macchina è rappresentato da una matrice

$$\begin{pmatrix} x \\ x' \\ y \\ y' \\ s \\ \frac{\Delta E}{E} \end{pmatrix}_2 = M_{6 \times 6} \begin{pmatrix} x \\ x' \\ y \\ y' \\ s \\ \frac{\Delta E}{E} \end{pmatrix}_1$$

La **matrice di trasferimento** dal punto  $s_1$  al punto  $s_2$  in un anello si trova moltiplicando le matrici di ogni elemento magnetico tra  $s_1$  e  $s_2$ :

Con il calcolo matriciale è possibile calcolare la matrice di trasferimento di un anello

$$M(s_1 \rightarrow s_2) = \dots M_4 \cdot M_3 \cdot M_2 \cdot M_1$$

Tale rappresentazione è essenziale per definire l'ottica lineare di un anello e quindi disegnare un anello.

Tutti i codici di simulazione di ottica utilizzano il calcolo matriciale.

I fasci di particelle agiscono  
come sorgente di campi  
elettromagnetici:

**self fields**

Questi campi interagiscono con  
ciò che li circonda, vengono  
modificati dalle condizioni al  
contorno (camera da vuoto, cavità,  
ecc) e agiscono a loro volta sul  
fascio stesso

Ciò può dare origine a una variazione delle frequenze proprie del  
fascio (frequenze di betatrone e sincrotrone),

può portare a:

**instabilità,**

o **modifica** della distribuzione del fascio,

o **allungamento** dei pacchetti.

Questi fenomeni si chiamano **effetti collettivi**

e sono naturalmente collegati al numero di particelle presenti nel fascio

# Il Ciclotrone classico anni 30 $E \approx 30$ MeV, p

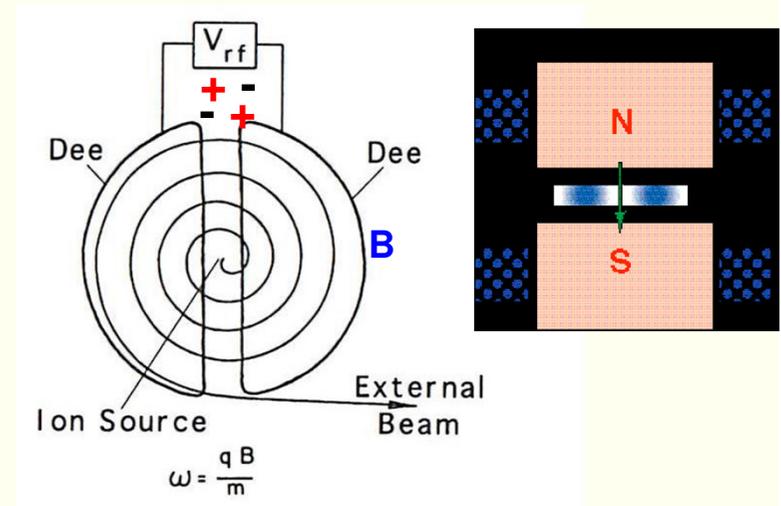
Il ciclotrone è costituito da un elettromagnete che genera un campo magnetico uniforme e due elettrodi cavi a forma di D ai quali viene applicata una tensione alternata con la frequenza tale che sia al passo con il moto delle particelle. Le particelle prodotte da una sorgente al centro del magnete spiralizzano verso l'esterno fino ad essere estratte ed inviate sul bersaglio.

L'accelerazione avviene per espansione dell'orbita.

Protoni non relativistici:

$$E_{\text{cin}} \cong \frac{p^2}{2m_0} = \frac{q^2 B^2 \rho^2}{2m_0} \rightarrow E_{\text{cin}} \propto \rho^2$$

$$\omega_{\text{rf}} = \omega_{\text{rev}} = \text{const} = \frac{qB}{m} = \frac{v}{\rho}$$



**Limite: All'aumentare dell'energia la frequenza di rivoluzione diminuisce (per effetto relativistico aumenta infatti  $m$ ), l'rf deve essere variata per mantenere il sincronismo**

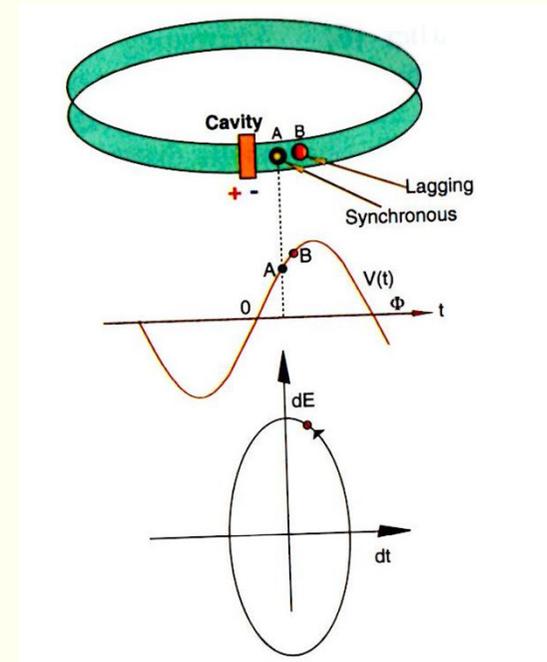
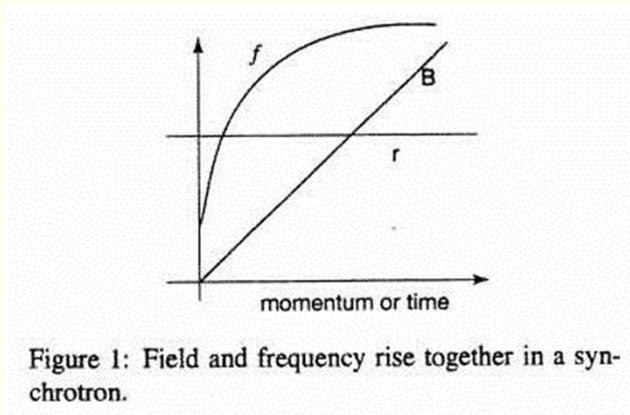
—————> **Sincrociclotrone: frequenza rf variabile nel tempo in sincronia con la frequenza angolare**

# Il Sincrotrone anni 50, 3GeV, p

Nel 1943 M. Oliphant sintetizzò tre vecchie idee in un nuovo concetto: il sincrotrone. Le idee erano: accelerare con risonatori, variare la frequenza, pulsare il magnete B. Nonostante la maggiore complessità del sistema si ebbe la possibilità di raggiungere energie più elevate con orbite costanti, tornando a sfruttare il principio di stabilità di fase.

$$\begin{cases} p = qB\rho \\ \rho = \text{const} \end{cases} \Rightarrow p \propto B$$

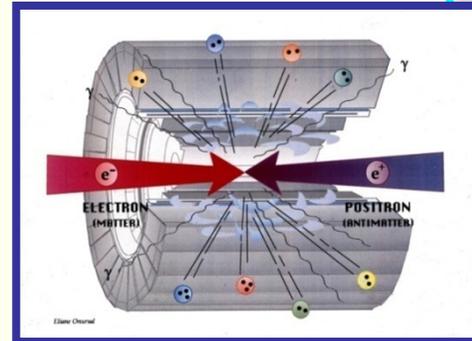
Fissata la traiettoria della particelle, B è variabile insieme alla loro energia



# L'idea di Bruno Touschek: i collider

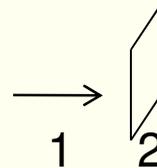


La geniale idea fu quella di utilizzare come particelle collidenti particelle ed antiparticelle che, nella loro annichilazione, avrebbero rilasciato tutta la loro energia per creare nuove particelle.



Collisione su targhetta fissa

$$E_{CM} \approx \sqrt{2E_1 m_2}$$



$$E_1 = E_{cin1}$$

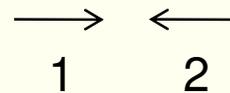
$$E_2 = E_{02} = m_{02} c^2$$

Esempio:  $E_1 = 450 \text{ GeV}$

$E_{cm} = 29 \text{ GeV}$

Due fasci uguali collidenti

$$E_{CM} \approx 2E$$

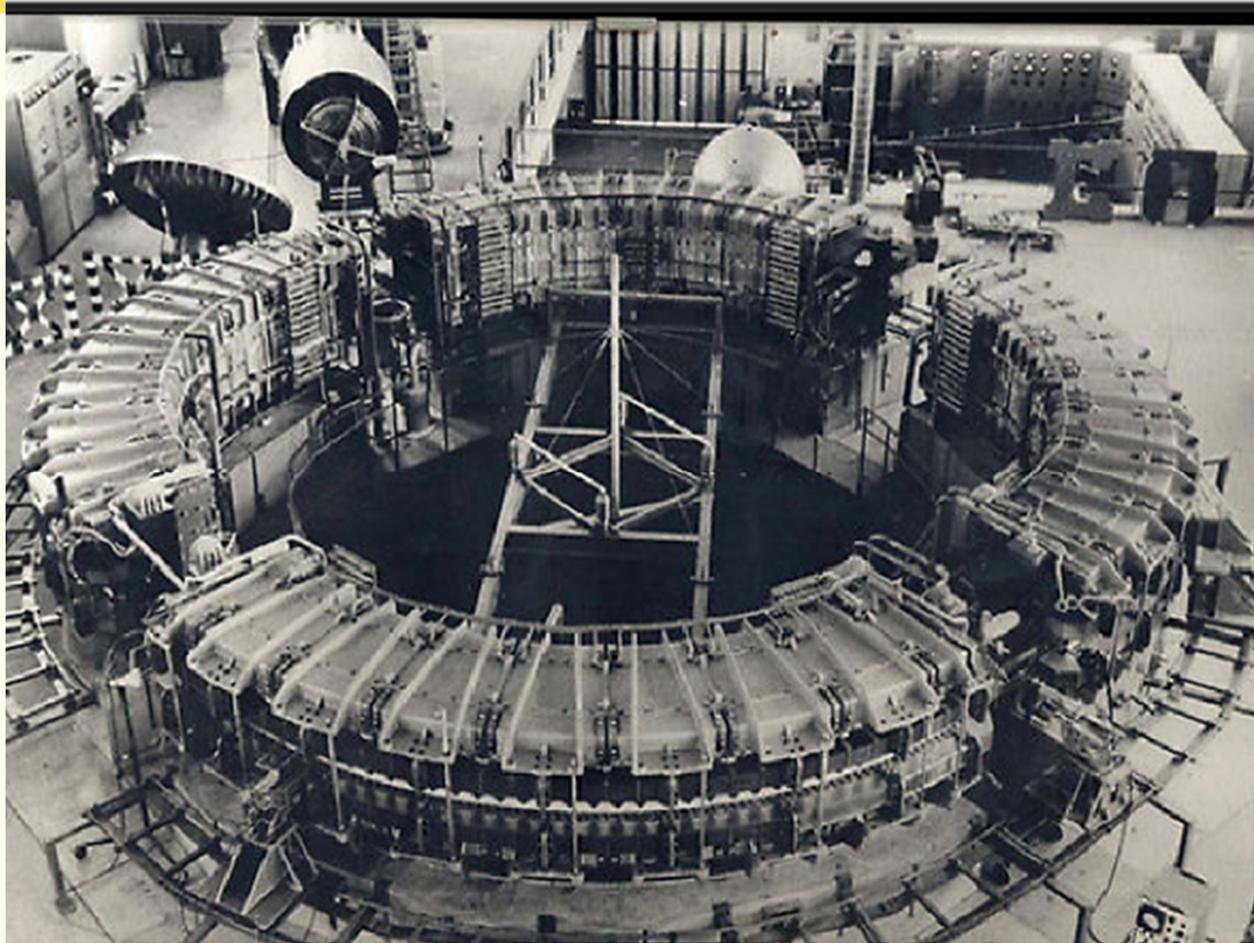


$E_{cm} = 900 \text{ GeV}$

Infatti:  $\vec{p}_1 = -\vec{p}_2$

$$E_{CM}^2 = (E_1 + E_2)^2 - \vec{p}_1 \cdot \vec{p}_2 c^2 \cong (2E_1)^2$$

# L'elettrosincrotrone di Frascati 1959-1975



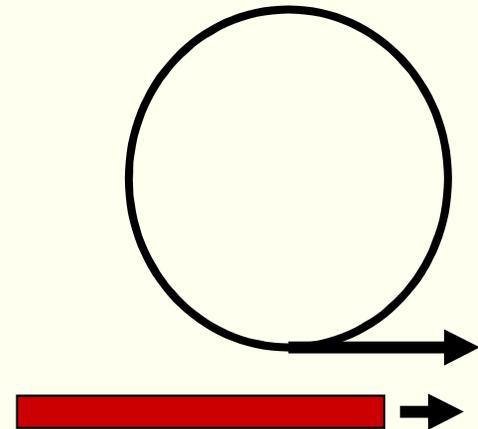
Fascio di  $e^-$  su targhetta, producendo fotoni di energia tra **0.4 - 1.1 GeV**.

Diametro di  **$\sim 9$  m**, costituito da 4 dipoli *weak focusing*

Risultati sulle risonanze pione-nucleone, diffusione elettrone-protone, decadimenti neutri del pione e proprietà del mesone  $\eta$

# L'osservazione su "targhetta"

sincrotrone



LINAC

$e^-, e^+, p \dots$

bersaglio

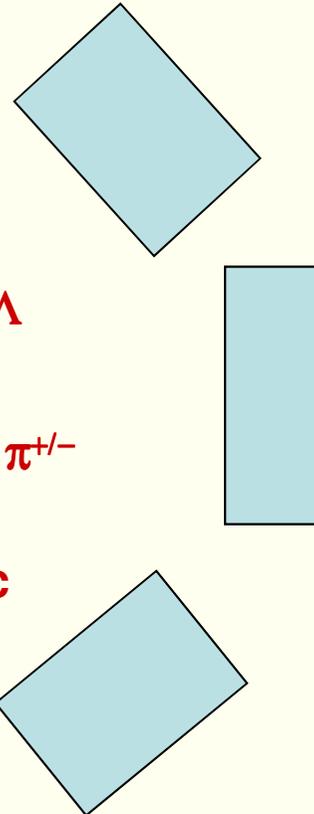


$\Sigma$

$\Lambda$

$\pi^{+/-}$

$p, n, \text{etc}$

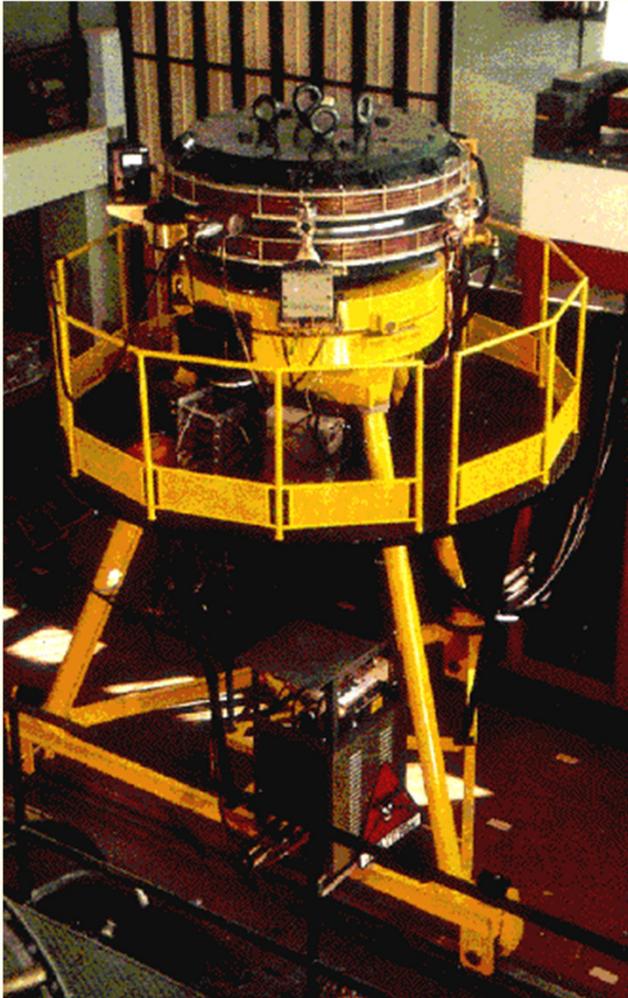


rivelatori

**La materia è vuota : cio' che non ha interagito viene perduto  
Energia a disposizione dell'interazione dovuta solo al fascio  
Il bersaglio è complesso: molte delle particelle prodotte disturbano  
l'esperimento**

# AdA (Anello di Accumulazione)

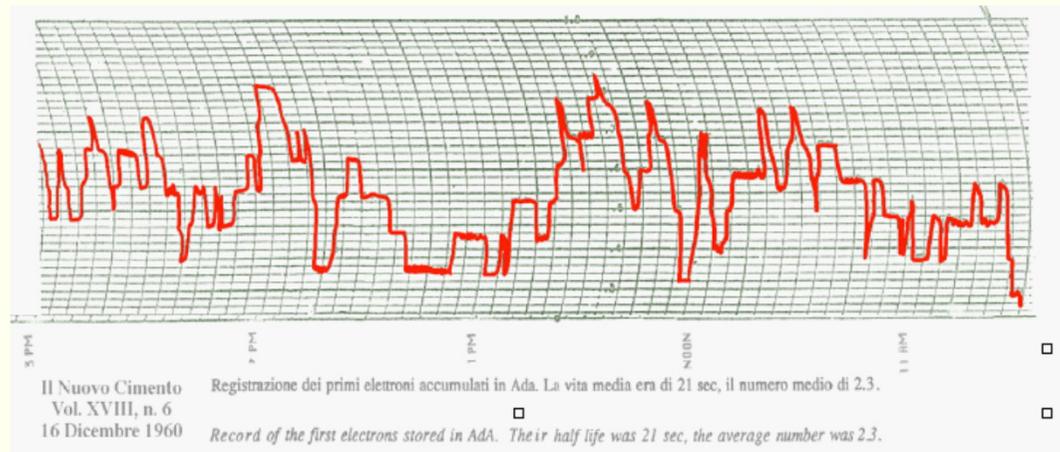
FRASCATI - 1961-1965



un grande dipolo weak focusing,  $E=0.25$  GeV su un'orbita circolare di 65 cm di raggio.

Vuoto  $\sim 10^{-10}$  Torr.

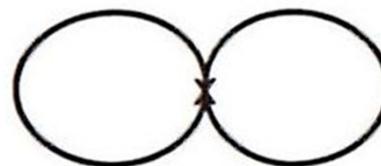
Cavità RF con campo oscillante a 147 MHz e  $V_{\text{peak}}=5$  KV, per compensare la perdita di energia per emissione di radiazione di sincrotrone.



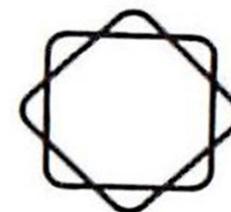
Registrazione dei primi elettroni accumulati in AdA.  
La vita media era **21 s**, il numero medio **2.3**

# Schemi di possibili collisori

**storage rings:** le particelle di ogni fascio ricircolano e si incontrano ripetutamente



(a)



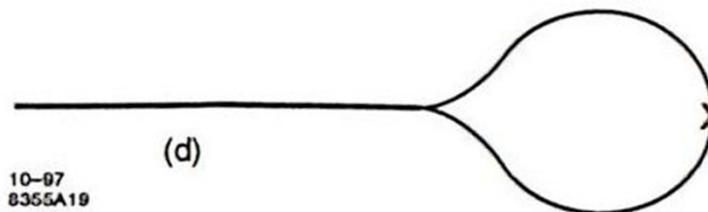
(b)

**linear colliders:** i fasci sono accelerati in un acceleratore lineare e poi fatti collidere. I fasci non si riutilizzano dopo una collisione.

Il caso (c) è più semplice, si usando due linacs; nel caso(d) particelle e antiparticelle sono accelerate nello stesso linacs e poi guidate fino a collidere.



(c)



(d)

# Conclusioni

- Motivazioni per cui si sono costruiti i primi acceleratori
- Concetti base di una macchina acceleratrice:
  - come si accelerano particelle cariche
  - Cosa vuol dire accelerare a velocità molto vicine a quelle della luce
  - Componenti chiave
  - Parametri che caratterizzano un fascio accelerato
- Principali tipologie acceleratori
  - Lineari
  - Circolari: ciclotrone, sincrotrone, anello di accumulazione, collider

**THE END**



# Due tipologie di acceleratori per capire struttura fondamentale della materia

Ci sono due vie per una nuova conoscenza della struttura fondamentale della materia:

- Frontiera dell'alta energia

Sonda a scale sempre più piccole  
Produzione di nuove particelle

Nuovi fenomeni (nuove particelle) creati quando  
l'energia  $> mc^2$  (x2)

$$E=mc^2$$

- Frontiera dell'alta precisione

Trovare la presenza di processi rari  
Misure di precisione di parametri  
fondamentali

Fenomeni noti studiati con alta precisione possono mostrare delle  
inconsistenze con la teoria

# Back-up

# Particelle cariche

**Massa a riposo =  
Energia a riposo  
di una particella**

$$E_0 = m_0 c^2$$

	e <sup>-</sup> , e <sup>+</sup>	p, p
E <sub>0</sub> (MeV)	0.511	938.27
m (kg)	9.11 10 <sup>-31</sup>	1.67 10 <sup>-27</sup>

- Il MeV è l'unità comunemente usata per la misura dell'energia delle particelle accelerate. 1 eV è l'energia acquistata da un elettrone che attraversa una differenza di potenziale di 1 V:  $1\text{eV}=1.6\cdot 10^{-19}$  Joules
- Analogamente il MeV viene usato per indicare la massa a riposo delle particella
- Un elettrone, la cui massa in unità convenzionali è di  $9.109\cdot 10^{-31}$  Kg viene quindi ad avere una massa a riposo di  $0.511\text{ MeV}/c^2$
- Per un protone di  $1.673\cdot 10^{-27}$  Kg, la massa a riposo è di  $938.27\text{ MeV}/c^2$

Questi acceleratori detti a radiofrequenza hanno la proprietà che il campo elettrico accelerante è oscillante positivo -negativo quindi accelerante-decelerante in un intero periodo di oscillazione.

quindi

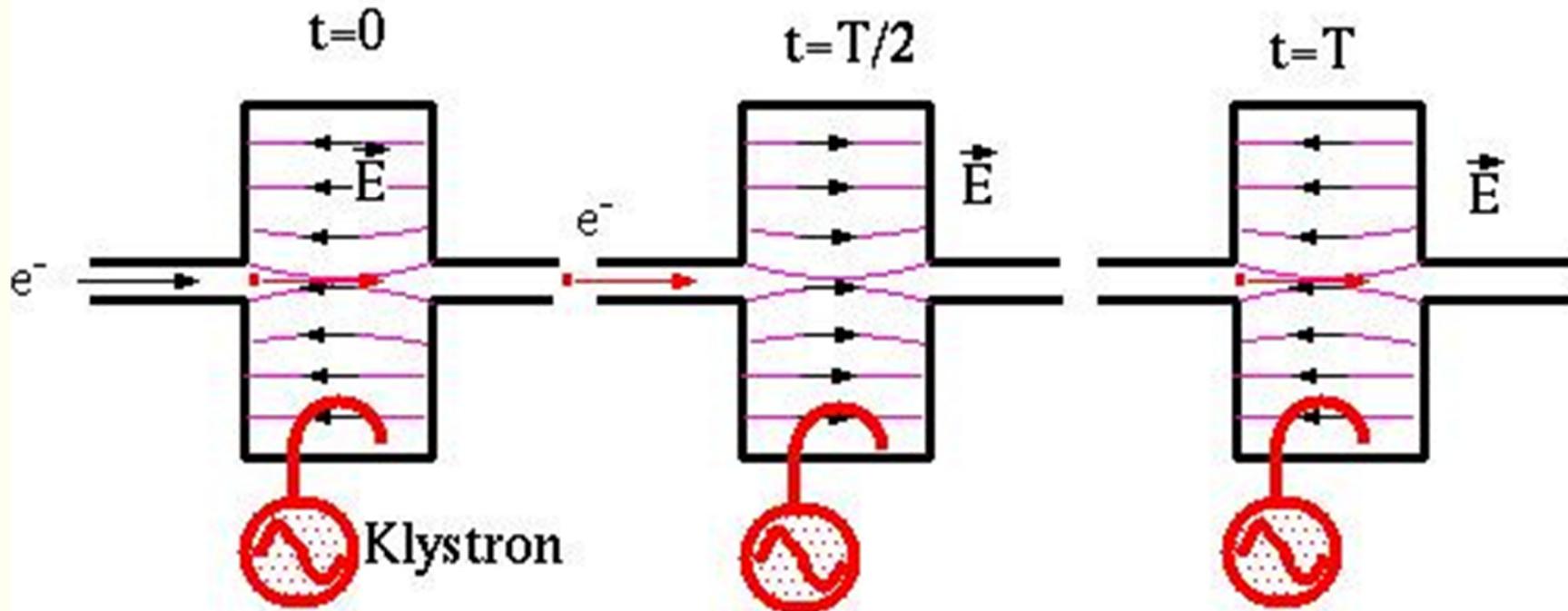
L'elettrone deve essere sempre "in risonanza" con la cresta negativa (la sua carica è negativa)

Gli elettroni saranno dei pacchetti molto sottili  $\Delta z < 1$  mm

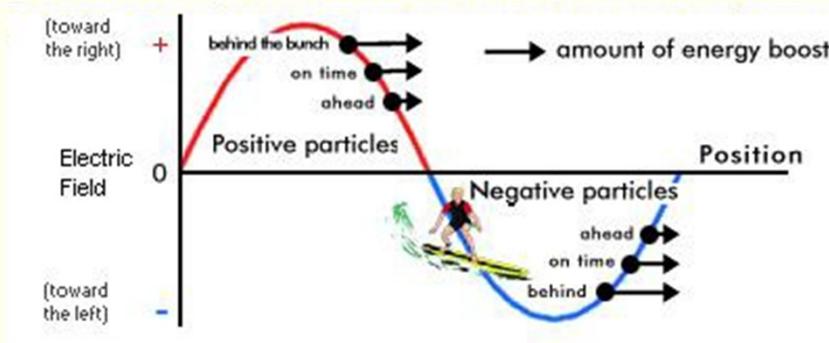
Dovranno essere sostanzialmente monocromatici altrimenti vanno fuori fase

Per questi acceleratori è stata sviluppata la teoria della stabilità di fase, una teoria non così semplice, ci richiederebbe lavagnate di formule e vari concetti nuovi

# sketch dell'oscillazione del campo in una cavita'

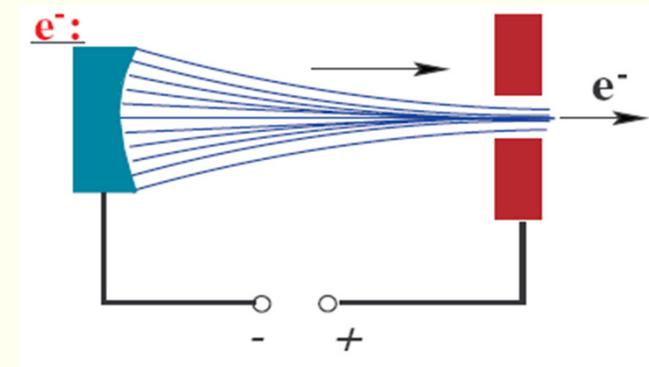


risonanza dell'elettrone in cavita' con il periodo del campo elettrico, dentro la cavita' con campo inverso

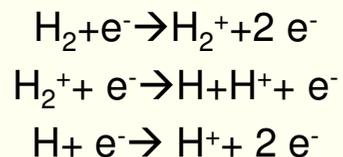


# Sorgenti

Produrre elettroni è banale. Si scalda un filo e si hanno gli elettroni. ➡ Si mette un campo elettrico (condensatore) e si ha il primo acceleratore  
Tubo a raggi catodici (televisione oscillografo video etc.)



Per creare i p si prende il tubo a raggi catodici e si buttano gli e su dell'idrogeno  
➡



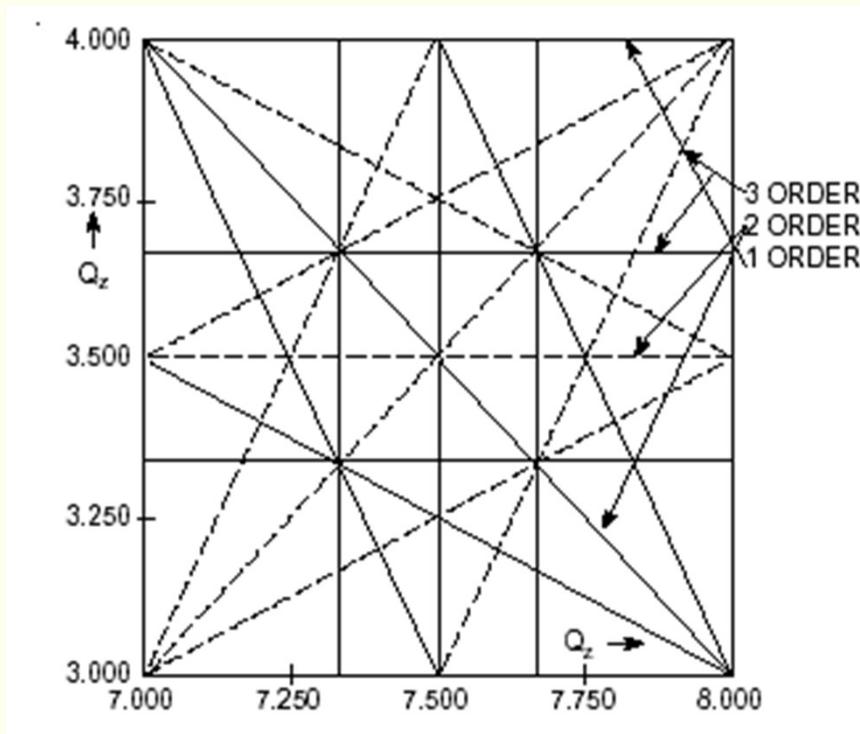
Le sorgenti utilizzate al giorno d'oggi sono un po' più complesse, ma in ogni caso,

Si parte con:

- Filo scaldato (e)
- Idrogeno (p)

# Risonanze

La frequenza di betatrone non è un numero intero:  
se così fosse, qualunque  
perturbazione ci fosse in un punto dell'anello sarebbe vista sempre  
con la stessa fase, e il suo effetto cumulativo potrebbe essere  
distruttivo per la particella



**ci sono quindi zone 'proibite'  
nel diagramma dei tunes:**

$$nQ_x + mQ_y = p, \quad n, m, p \text{ interi}$$