

Fisica degli acceleratori

Grazia D'Agostino
INFN-LNS



- Principi e concetti fondamentali
 - Definizione di un acceleratore di particelle
 - Principio di funzionamento di un acceleratore di particelle
 - Il ruolo degli acceleratori di particelle nella ricerca di base
 - Classificazione degli acceleratori
 - Sviluppo degli acceleratori e loro applicazioni

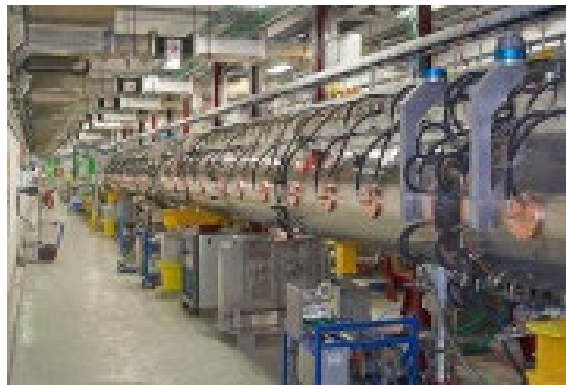
- Gli acceleratori dei Laboratori Nazionali del Sud
 - Tandem
 - Ciclotrone Superconduttore

Cosa è un acceleratore di particelle

Un Acceleratore di Particelle è un **apparato** atto all'**accelerazione di particelle cariche** lungo una **traiettoria prefissata**, al fine di raggiungere una determinata **energia**.

- **Apparato** = > apparecchiatura artificiale complessa
- **Particelle cariche** => elettroni, protoni, ioni, ecc...
- **Accelerazione lungo una traiettoria prefissata** => applicazione di forze elettromagnetiche

I diversi tipi di acceleratori si suddividono in base alla loro forma in due grandi famiglie:



LINEARI



CIRCOLARI

Energia: Unità di misura e ordini di grandezza

- L'unità di misura per l'energia nel sistema internazionale è il joule (J).
- Tuttavia, nella Fisica degli acceleratori si usa normalmente l'**elettronvolt**.
- L'elettronvolt è l'energia cinetica acquisita da un elettrone sottoposto a una differenza di potenziale di 1 volt.

$$1 \text{ eV} \equiv q \cdot \Delta V = (1.602 \times 10^{-19} \text{ C}) \cdot (1 \text{ V}) = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$$

- Le energie di legame degli elettroni atomici sono nell'ordine degli eV, mentre quelle per rimuovere un protone o un neutrone da un nucleo sono nell'ordine dei MeV.

L' elettronvolt e i suoi multipli

1 eV	10^3 eV	10^6 eV	10^9 eV	10^{12} eV
1 eV	1 keV	1 MeV	1 GeV	1 TeV

Moto di una particella carica in un campo E ed in un campo B

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_e + \mathbf{F}_m$$

Le forze applicate sulle cariche elettriche (**forza di Lorentz**) sono di due tipi: forza elettrica \vec{F}_e e forza magnetica \vec{F}_m .

$$\mathbf{F}_e = q\mathbf{E}$$

La forza elettrica è parallela al campo elettrico.

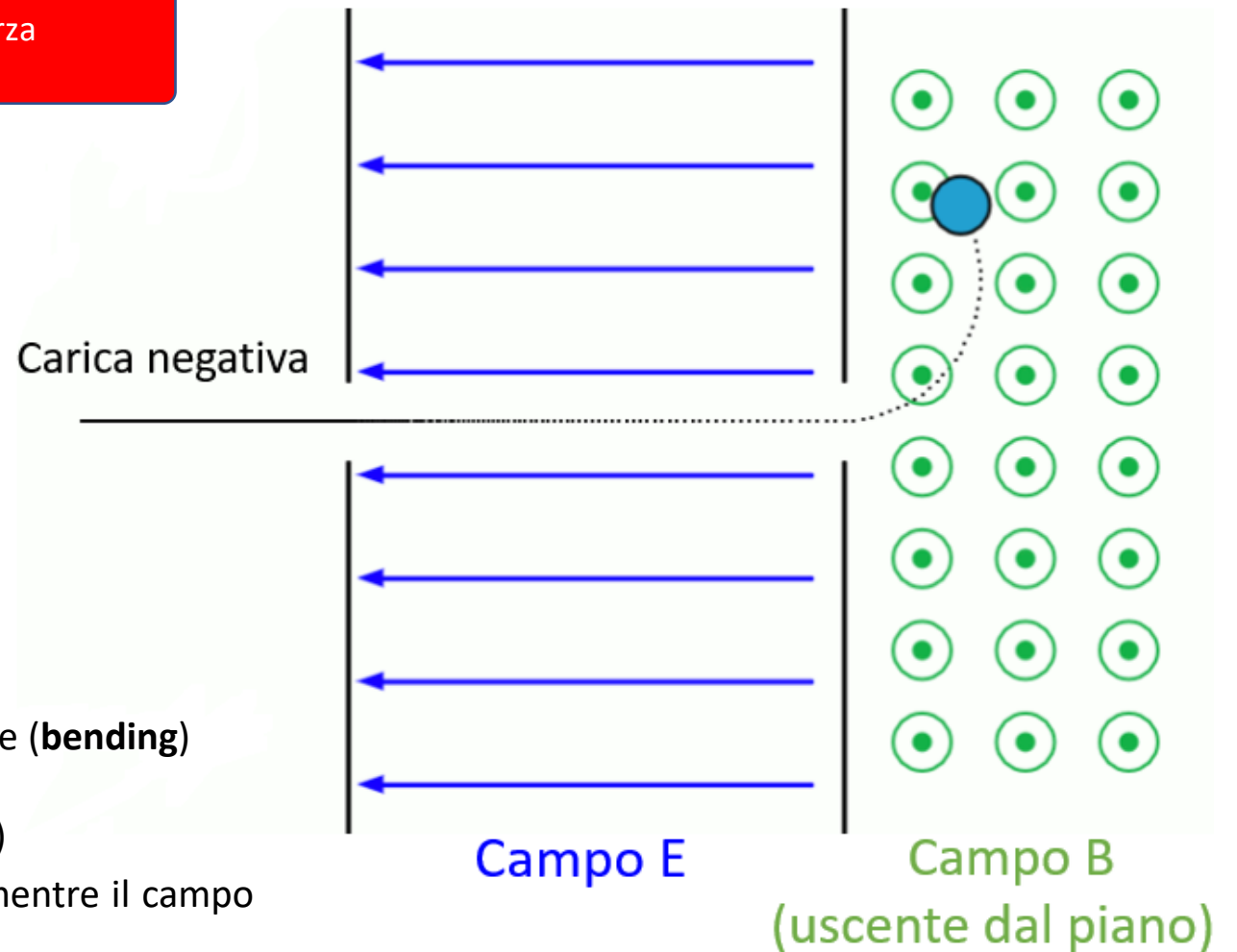
$$\mathbf{F}_m = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

La forza magnetica è perpendicolare al piano individuato dalla velocità della particella e dal campo magnetico.

L'azione combinata di campi magnetici ed elettrici permette di:

- mantenere una particella carica in moto su un'orbita circolare (**bending**)
- aumentare l'energia (**acceleration**)
- contenere la divergenza angolare della traiettoria (**focussing**)

Il campo **E** compie **lavoro** sulla particella carica e la **accelera**, mentre il campo **B** no.



Brevissimi cenni di relatività

- Le leggi della Fisica sono le stesse in tutti i sistemi di riferimento inerziali.
- La luce si propaga nel vuoto a velocità costante $c=2.998 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ indipendentemente dal sistema di riferimento e dalla velocità dell'oggetto che la emette.

Di conseguenza la cinematica e la dinamica dovranno modificarsi di conseguenza.

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

$$E_{\text{kin}} = m_0 c^2 (\gamma - 1) = m_0 \gamma c^2 - E_0$$

Energia cinetica relativistica

$$E_0 = m_0 c^2 \quad \text{Energia a riposo}$$

$$p = mv = m_0 \gamma v = m_0 \gamma \beta c$$

Quantità di moto relativistica

Energie (impulsi) sono classificati come segue:

$\gamma \sim 1$ regime non relativistico

$\gamma > 1$ regime relativistico

$\gamma \gg 1$ regime ultrarelativistico

Brevissimi cenni di relatività

- Le leggi della Fisica sono le stesse in tutti i sistemi di riferimento inerziali.
- La luce si propaga nel vuoto a velocità costante $c=2.998 \cdot 10^8$ m/s indipendentemente dal sistema di riferimento e dalla velocità dell'oggetto che la emette.

Di conseguenza la cinematica e la dinamica dovranno modificarsi di conseguenza.

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

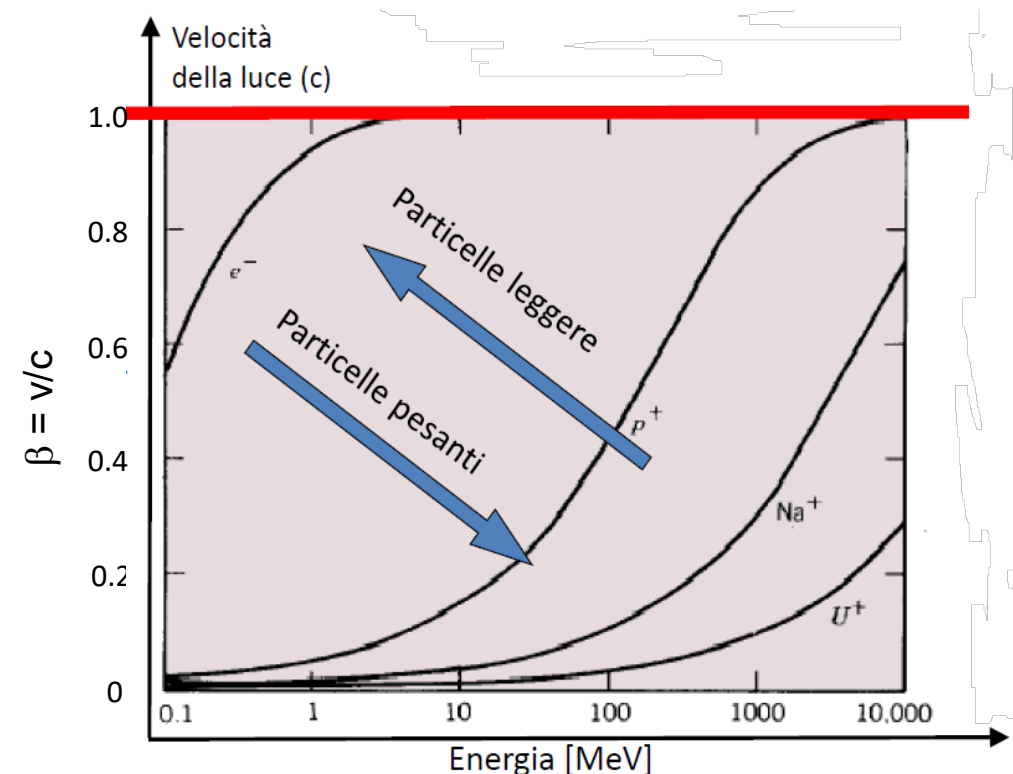
$$E_{\text{kin}} = m_0 c^2 (\gamma - 1) = m_0 \gamma c^2 - E_0$$

Energia cinetica relativistica

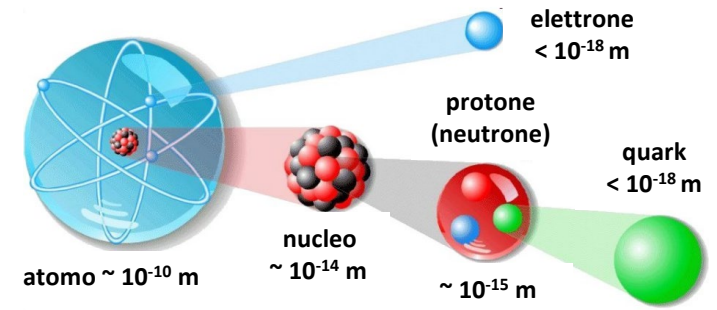
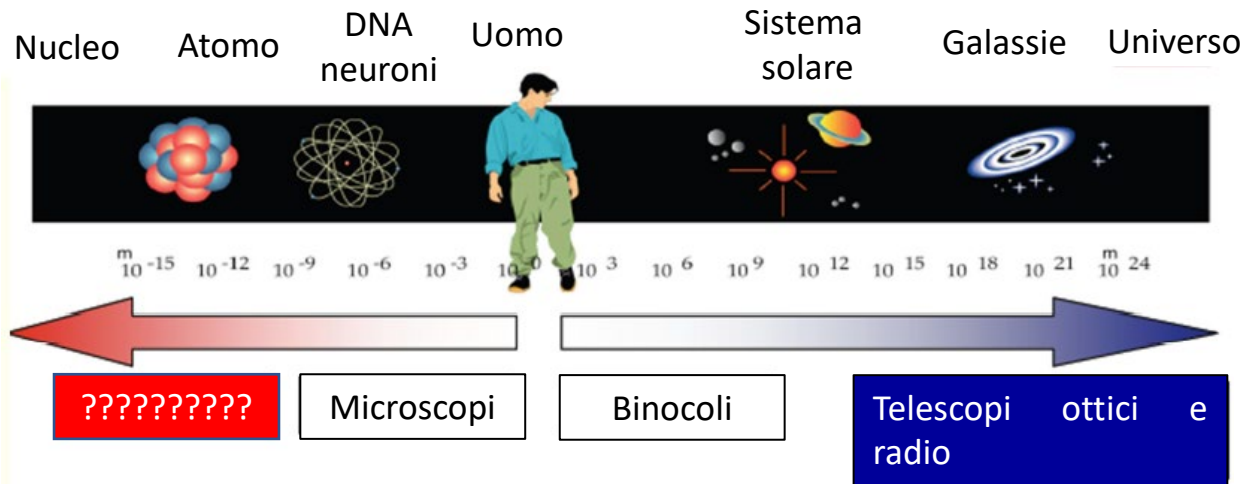
$$E_0 = m_0 c^2 \quad \text{Energia a riposo}$$

$$p = mv = m_0 \gamma v = m_0 \gamma \beta c$$

Quantità di moto relativistica

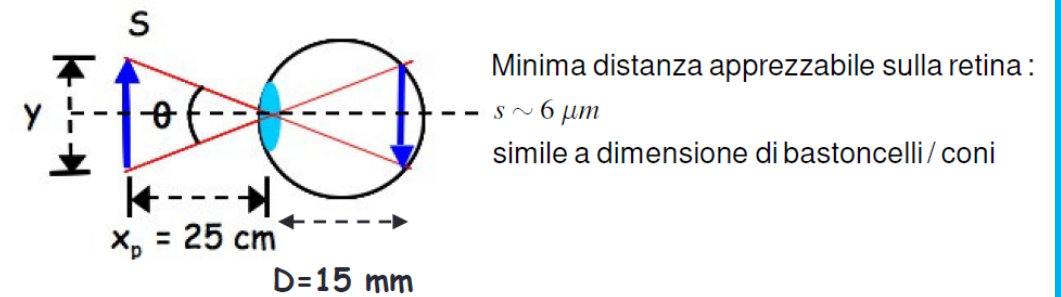


Come studiare l'infinitamente piccolo?



Come osservare sistemi così piccoli?

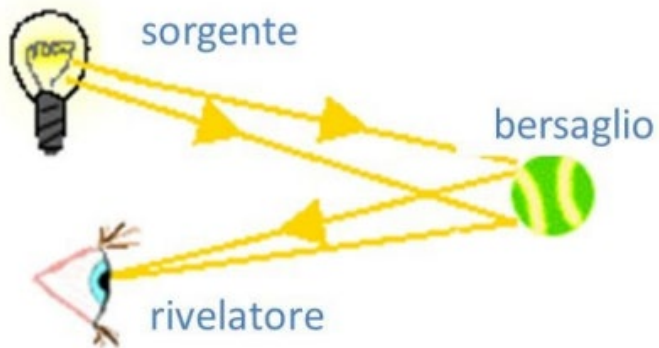
Limite di osservabilità dell'occhio umano:



$$\theta = s/D = 0.4 \cdot 10^{-3} \text{ rad (un po' meno di } 1')$$

$$y = x_p \theta = 0.25 \text{ m} \cdot 4 \cdot 10^{-4} = 0.1 \text{ mm} = 100 \mu\text{m} = 10^{-4} \text{ m}$$

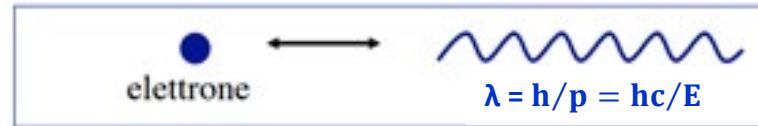
L'occhio umano è un rivelatore di fotoni



Come studiare l'infinitamente piccolo?

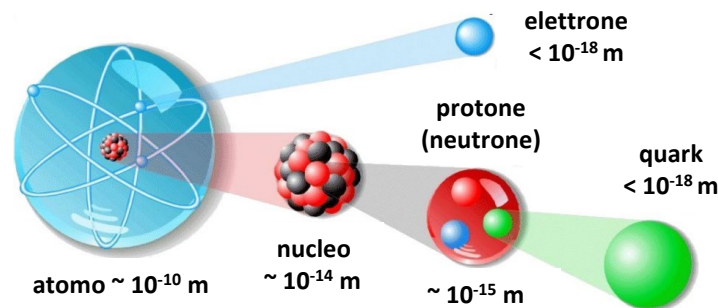
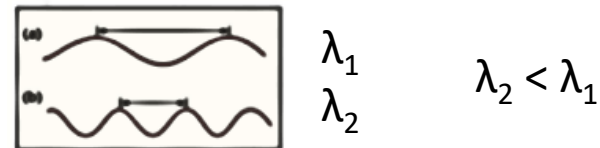
Meccanica quantistica:

Principio di De Broglie (Nobel 1929): principio di dualità onda-particella



Per vedere una struttura di dimensione k , occorre una "sonda" di lunghezza d'onda $\lambda \ll k$.

Tanto più la lunghezza d'onda è piccola [tanto più l'energia è grande] tanto più piccole sono le dimensioni esplorabili.



Per "vedere" fenomeni fisici in scale di lunghezza sempre più piccole, occorre adoperare energie sempre più grandi.

Per investigare strutture con dimensioni dell'ordine di 10^{-14} - 10^{-18} m
→ **Particelle ad alta energia**

Dove troviamo particelle ad alta energia?

Sorgenti radioattive:

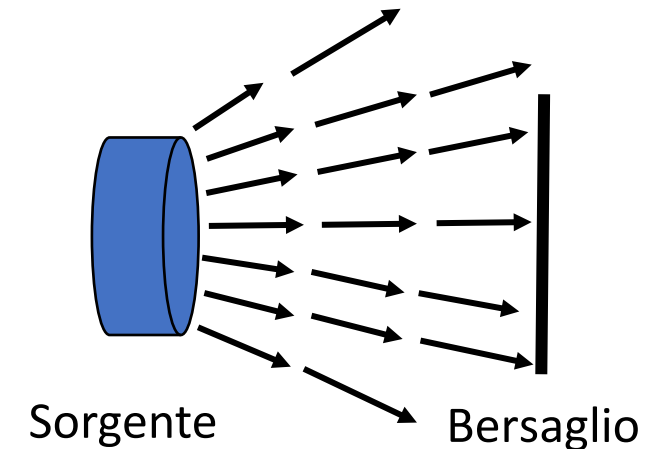
Nuclei pesanti (= con molti protoni e neutroni) che hanno una struttura instabile ed emettono particelle portandosi in una forma più stabile



PRO: Energia ben definita... anche se non troppo alta (alcuni MeV)

CONTRO: Difficoltà a ottenere un fascio di particelle ben collimato

Esempio: Esperimento di Rutherford



Dove troviamo particelle ad alta energia?

Raggi cosmici:

Particelle di altissima energia (fino a 10^{20} eV) che provengono dal cosmo (origine sia galattica sia extragalattica)

10^{20} eV corrisponde all'energia cinetica di una pallina da tennis lanciata a 100 km/h!



PRO: Energia molto superiore a quelle ottenibili con qualsiasi macchina umana

CONTRO: Intensità (numero di particelle che arrivano nell'unità di tempo) troppo piccola (per $E \sim 1$ GeV ($=10^9$ eV) circa 1 per m^2 per secondo, per $E \sim 10^6$ GeV circa 1 per m^2 per anno, per $E \sim 10^{20}$ eV circa 1 per km^2 per secolo)

Come possiamo ottenere fasci di particelle con alta intensità ed energia ben determinata?

➡ **Acceleratori di particelle**

Classificazione degli acceleratori

Esistono diversi tipi di acceleratori in funzione delle esigenze del particolare esperimento o applicazione. Le principali richieste riguardano:

- l'energia
- l'intensità
- il tipo di particella (elettroni, protoni, ioni pesanti)

Gli acceleratori si possono classificare in due categorie principali:

- **acceleratori a bersaglio fisso**
- **acceleratori a collisione (colliders)**

Tra gli acceleratori a bersaglio fisso si distinguono:

- **acceleratori elettrostatici**
- **acceleratori ciclici:**
 - Lineari
 - Circolari

Sviluppo degli acceleratori di particelle

Finchè rimangono questione aperte di fisica fondamentale, ci sarà ricerca anche nel campo della fisica e tecnologia per produrre acceleratori sempre più avanzati

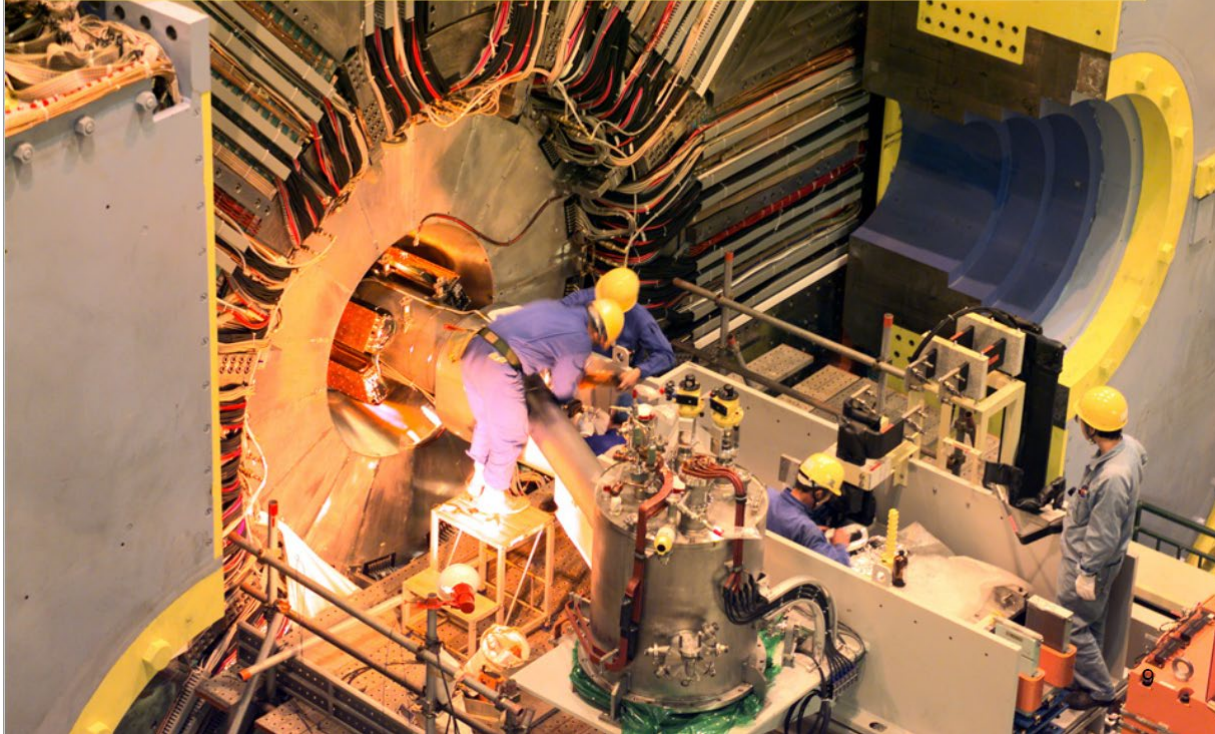
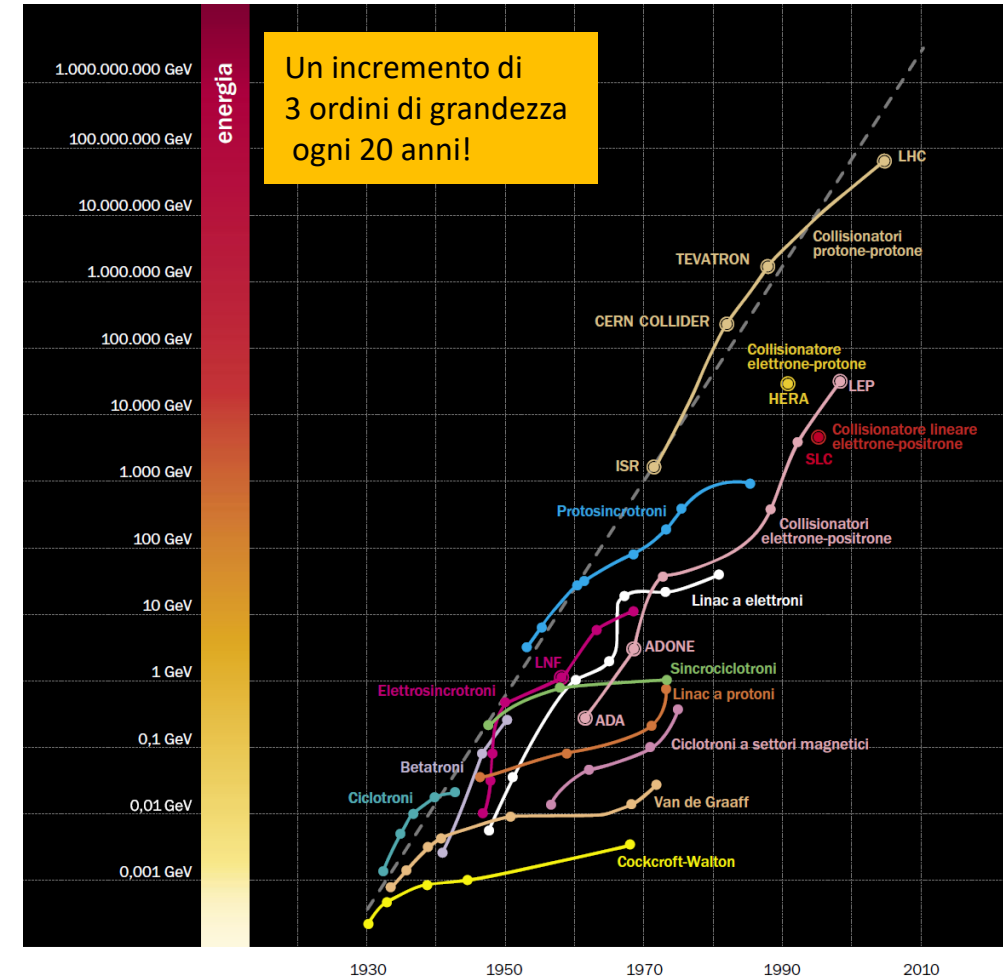
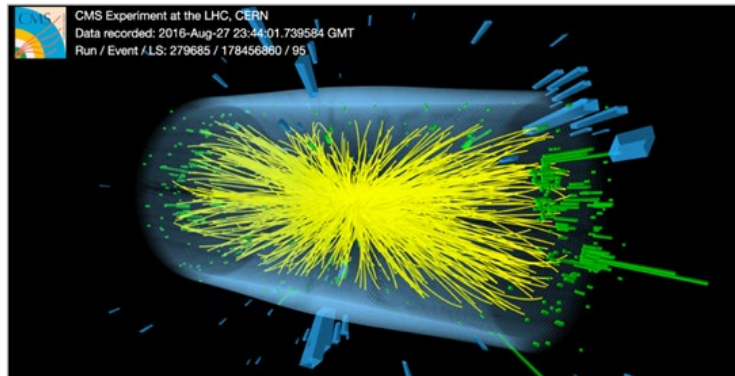


Diagramma di Livingston



Applicazioni degli acceleratori di particelle

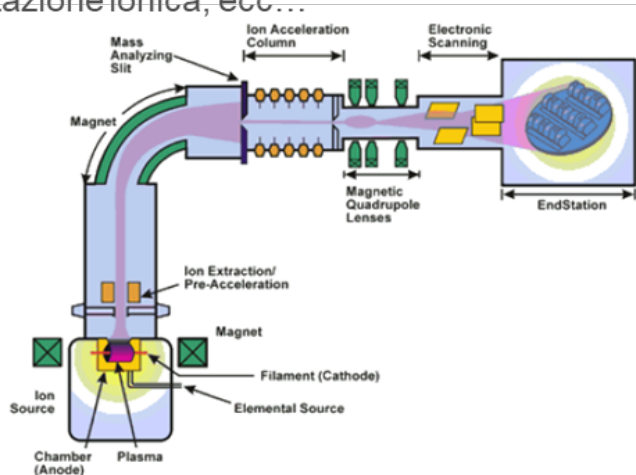
Fisica nucleare e subnucleare: studiare l'infinitamente piccolo



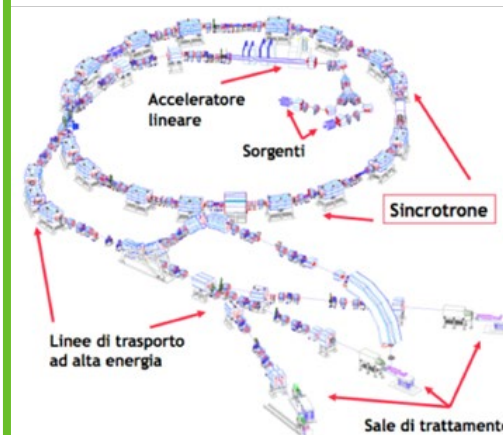
Fisica della materia: sorgenti di radiazione per lo studio della struttura della materia e le sue proprietà



Applicazioni industriali: sterilizzazione dei materiali, impiantazione ionica, ecc...

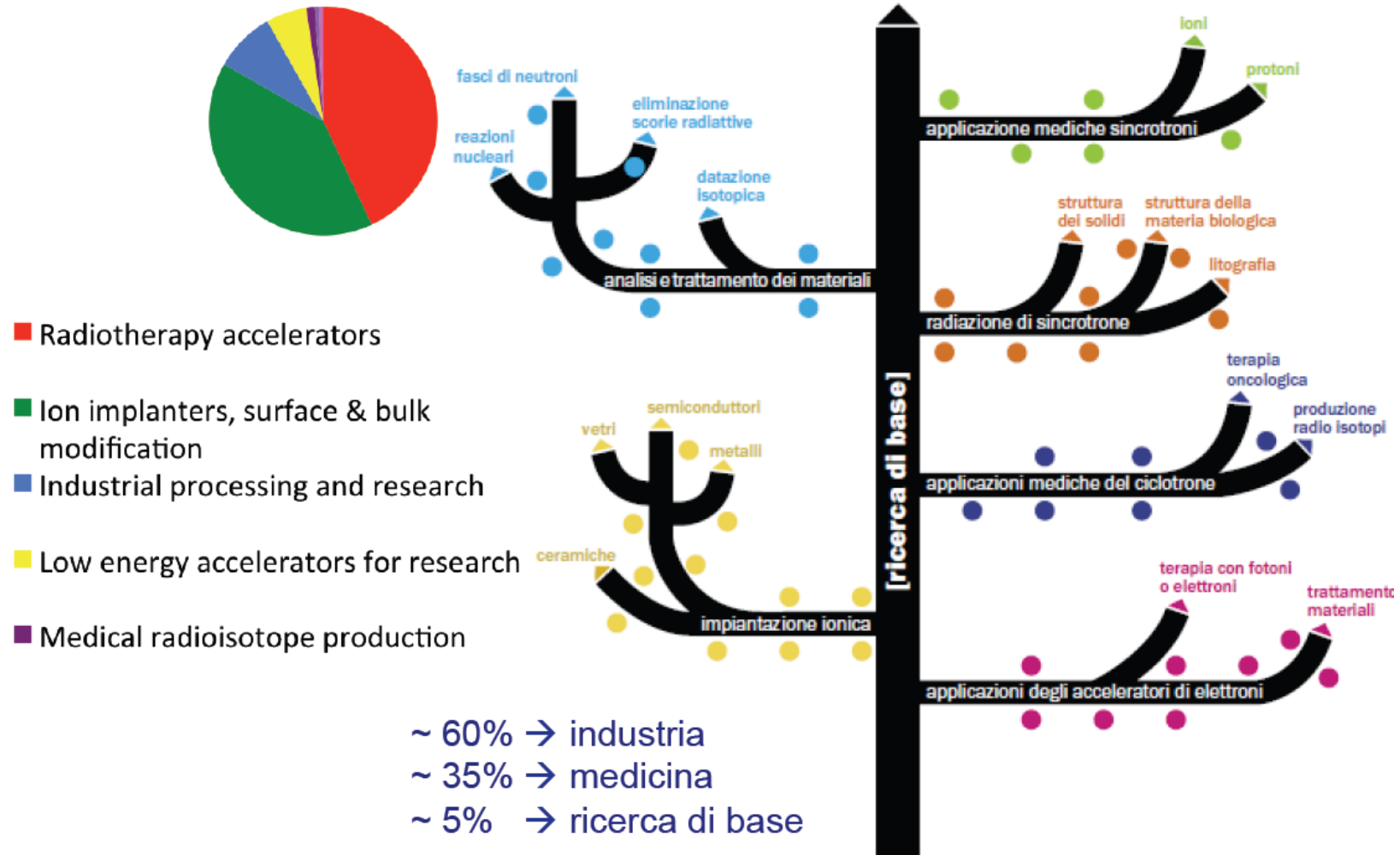


Applicazioni mediche: cura dei tumori (radioterapia, adroterapia) e produzione di radioisotopi



Applicazioni degli acceleratori di particelle nel mondo

Principali settori applicativi dei > 30000 acceleratori nel mondo

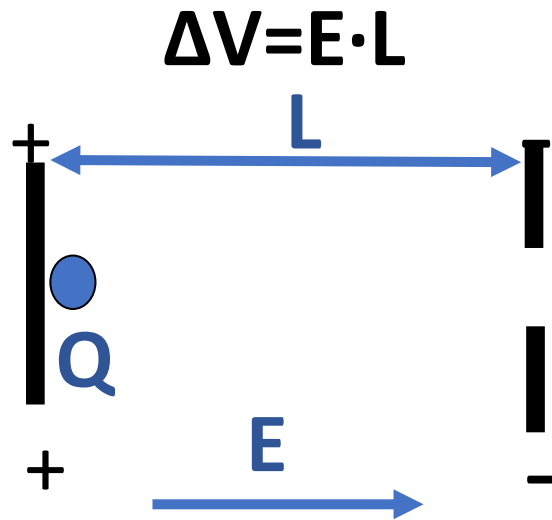


Gli acceleratori elettrostatici

Principio di funzionamento:

Una d.d.p. applicata fra due elettrodi viene utilizzata per accelerare le particelle cariche.

L'energia conferita dipende dalla d.d.p. applicata tra gli elettrodi e dalla carica elettrica della particella da accelerare.

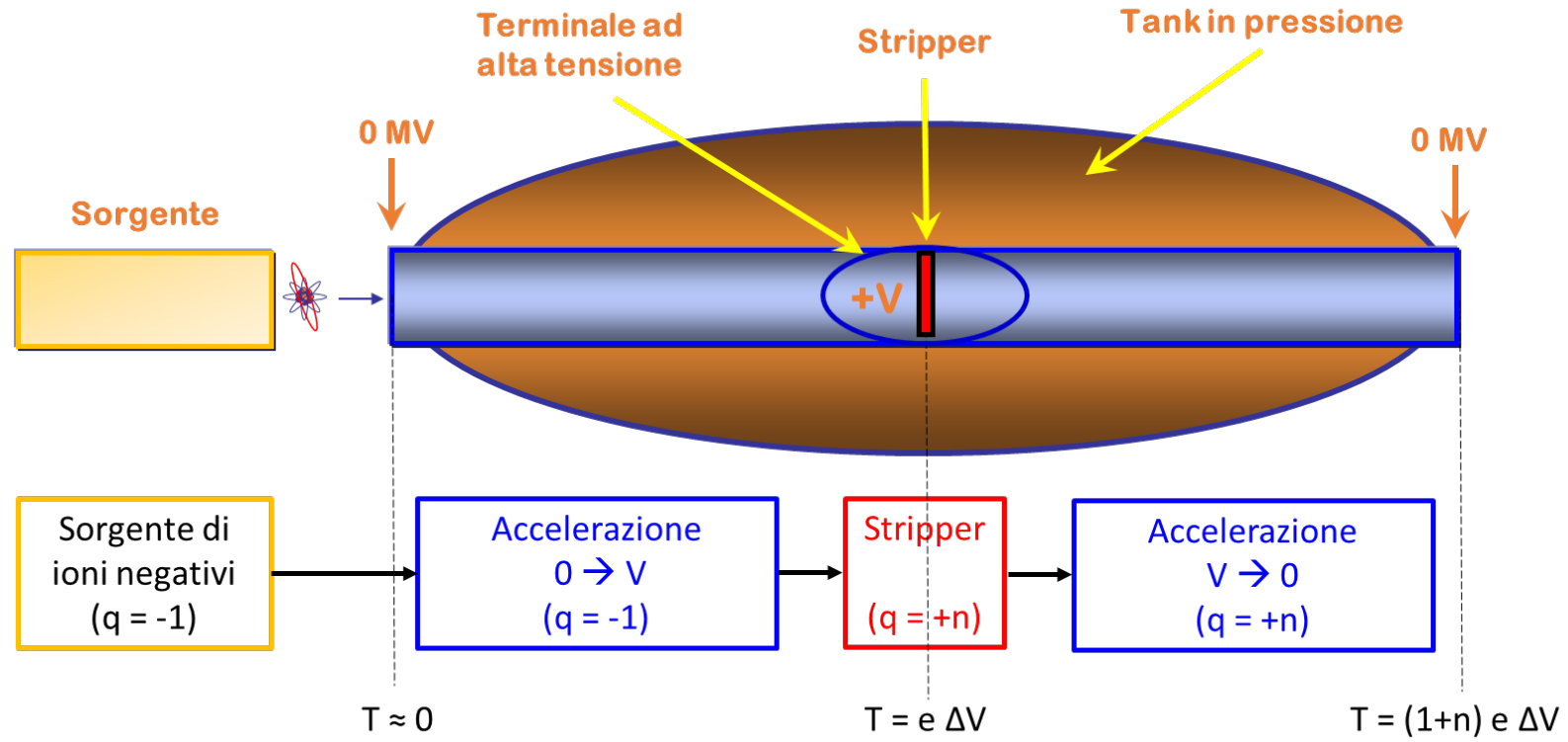


$$E_{\text{cin}} = \Delta V \cdot Q$$

Limitazione principale:

Già a d.d.p. di pochi MV si verificano scariche che abbassano la tensione e ne rendono impossibile il funzionamento.

Acceleratore elettrostatico TANDEM

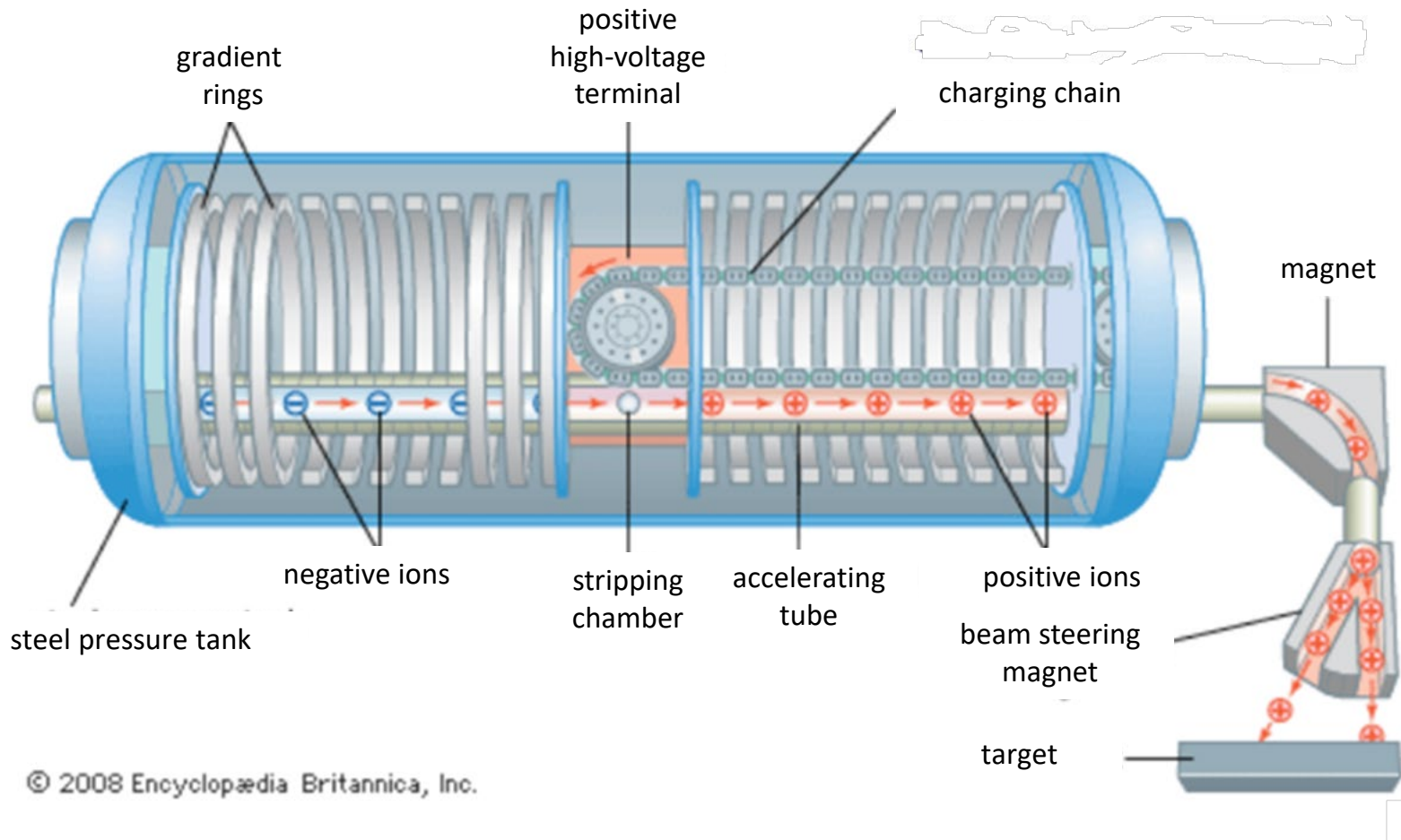


$$T_{fin} = 1e \Delta V + ne \Delta V = (1+n) e \Delta V$$

^1H	$n = 1$	$T_{fin} = (1+1) e 15 \text{ MV} = 30 \text{ MeV}$	se V al terminale = 15 MV
^{197}Au	$n = 13$	$T_{fin} = (1+13) e 15 \text{ MV} = 210 \text{ MeV}$	

- Terminale ad alta tensione (V ~ 15 MV)
- Le particelle cariche sono accelerate due volte all'interno dell'acceleratore.
- Ioni negativi (q=-1) vengono prodotti da un'apposita sorgente e accelerati fino all'ingresso dell'acceleratore.
- Gli ioni negativi sono accelerati fino al terminale ad alta tensione.
- Gli ioni negativi impattano su un foglio in carbonio (stripper) perdendo due o più elettroni.
- Gli ioni divenuti carichi positivamente sono accelerati dal terminale a ground.

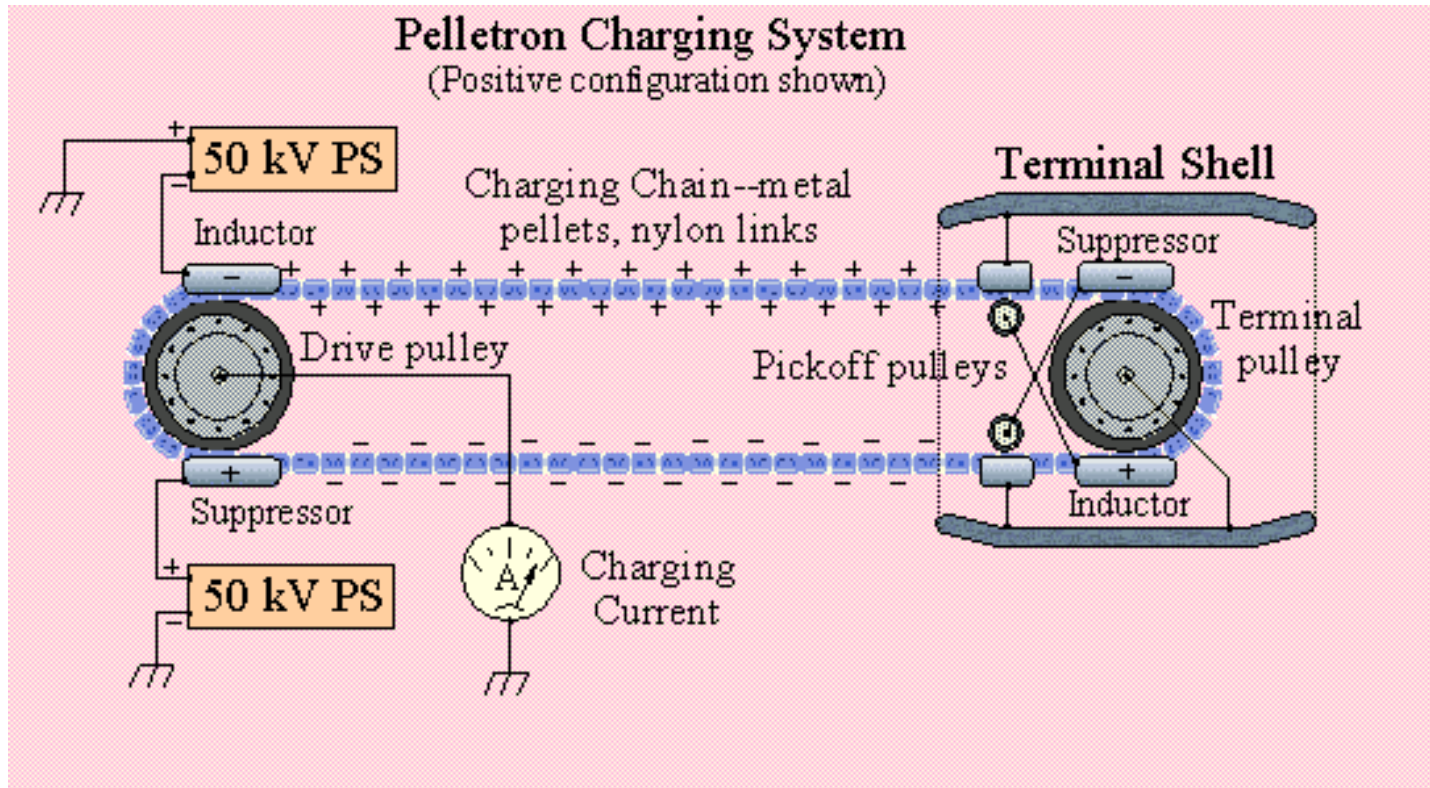
Acceleratore elettrostatico TANDEM



Elementi costituenti :

- Sorgente di ioni negativi
- Tubo di accelerazione
- Camera di stripping
- Terminale ad alta tensione
- Partitore resistivo
- Generatore elettrostatico
- Tank in pressione
- Magnete di selezione


Acceleratore elettrostatico TANDEM



- Un generatore elettrostatico (**Pelletron**) è utilizzato per trasportare la carica al terminale.
- Il sistema è costituito da catena di pellet di metallo collegati da maglie di nylon isolanti caricate per **induzione**.
- L'elettrodo induttore caricato negativamente (collegato ad un alimentatore esterno) induce una carica positiva nei pellet in moto dalla puleggia motrice verso il terminale.
- La catena trasporta la carica positiva al terminale ad alta tensione.
- Al terminale, l'elettrodo soppressore caricato negativamente impedisce che avvengano scariche elettriche quando i pellet entrano in contatto con la puleggia al terminale.
- Il processo inverso avviene quando i pellet si muovono dal terminale alla puleggia motrice.

Acceleratore elettrostatico TANDEM

- Tutte le parti ad alta tensione sono mantenute in una atmosfera di gas isolante, ad elevata rigidità dielettrica, generalmente costituita da SF₆ (Esafluoruro di Zolfo) a pressione di circa 7 bar
- SF₆ è un gas trasparente, privo di odore, non tossico e non infiammabile (sotto condizioni standard)
- Aumento del limite di breakdown a valori maggiori di 10 MV/m

3 MV/m
aria  > 10 MV/m
SF₆

Importante mantenere i corretti parametri funzionali di purezza e secchezza.

Esempio: Umidità in SF₆

- Riduzione della rigidità dielettrica
- Formazione di gas tossici

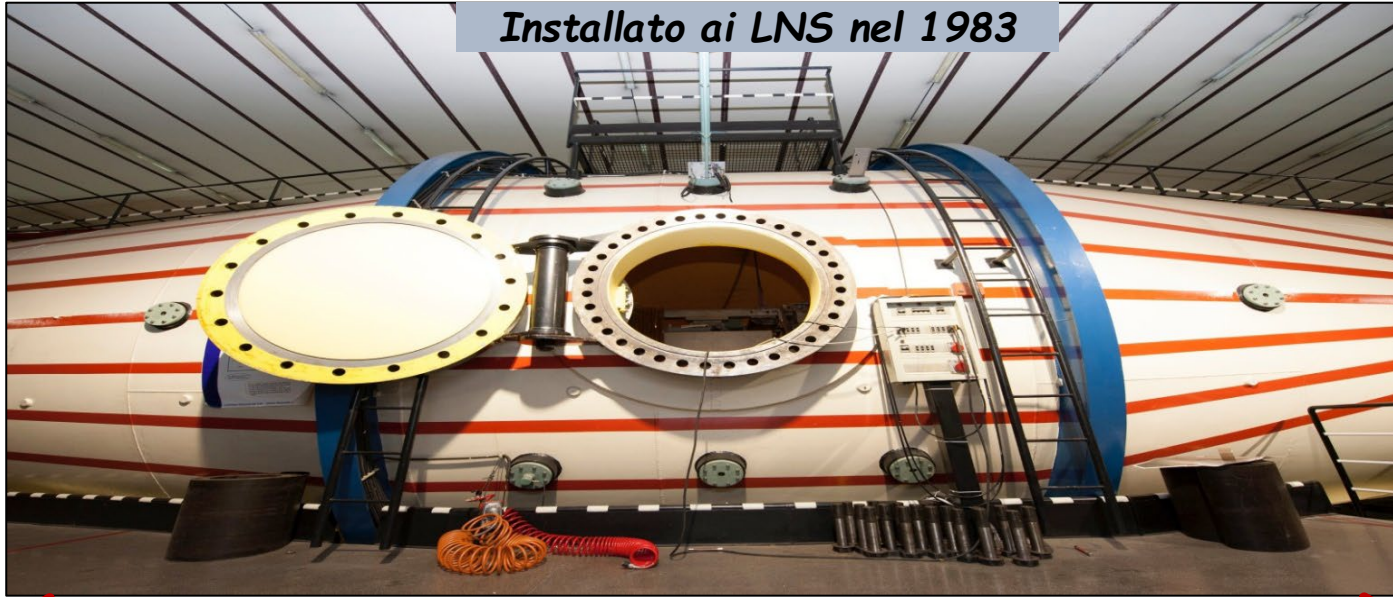
→ Sistema di ricircolazione ed essiccazione del gas

Tossicità di alcuni sotto-prodotti derivanti dalla decomposizione di SF₆

Gas	Toxicity	
	Tolerated Quantity (mg/m ³)	Degree of Toxicity
SF ₄	0.1	Moderately toxic
SOF ₄	2.5	Little toxic
SOF ₂	2.5	Little toxic
SO ₂ F ₂	5	Moderately toxic
SO ₂	2	Moderately toxic
S ₂ F ₁₀	0.025	Very toxic
SiF ₄	2.5	Little toxic
HF	3	Moderately toxic

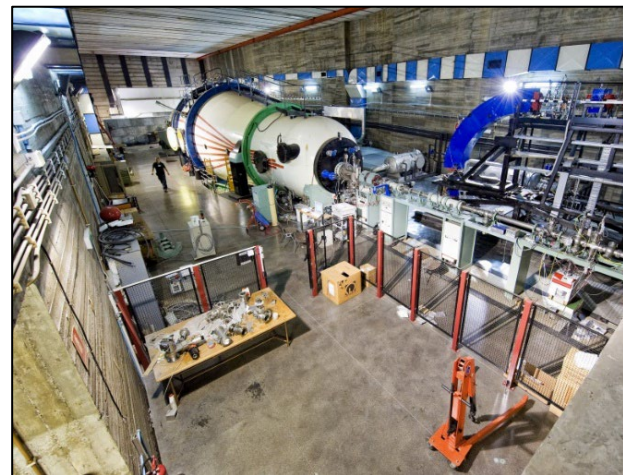
L'acceleratore TANDEM dei LNS

Installato ai LNS nel 1983



Peso
130
tonnellate

Lunghezza
25 m



Tensione al terminale: 14-15 MV

Ioni: da ^1H fino a ^{197}Au

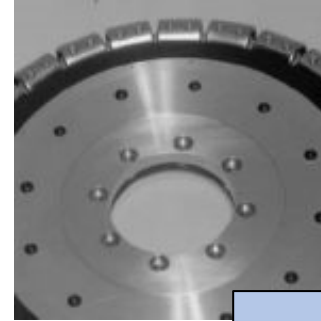
Corrente: centinaia di nA

Energia: fino a 200 MeV

Applicazioni:

- Astrofisica nucleare
- Studio del danno da radiazione su componentistica elettronica
- Caratterizzazione di reperti archeologici

L'acceleratore TANDEM dei LNS



Pelletron



Sorgente di ioni negativi



Partitore resistivo



Tank di stoccaggio di SF₆

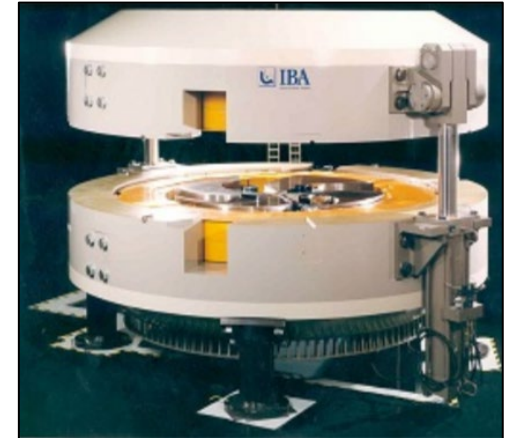
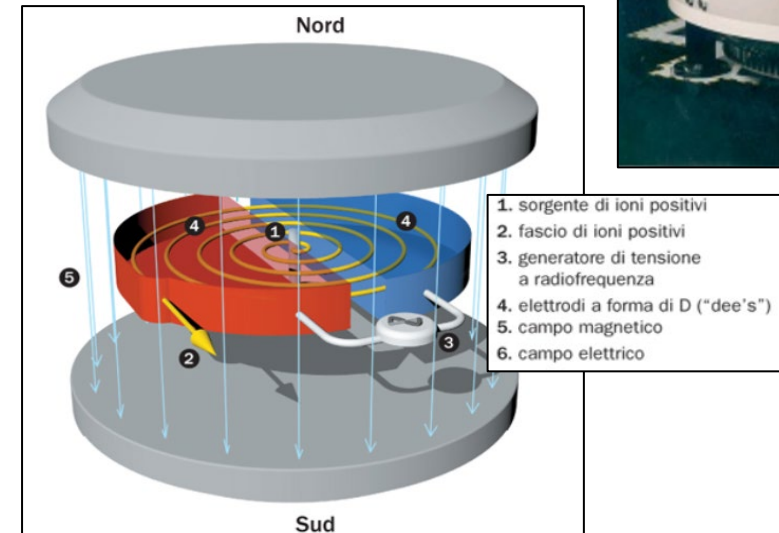
Il ciclotrone

- Acceleratore di particelle di tipo circolare
- La struttura accelerante è utilizzata più volte
- Energie da qualche MeV fino a parecchie centinaia di MeV
- Diverse applicazioni (medicina, industria, ricerca fondamentale)

Le strutture accelerante e magnetica sono completamente integrate
→ **acceleratore compatto**

Principali componenti:

- **Magnete**
 - Mantiene le particelle accelerate su un'orbita a spirale
- **Sistema accelerante a radiofrequenza (RF)**
 - Accelera le particelle
- **Sistema del vuoto**
 - Realizza una condizione di alto vuoto nella camera di accelerazione.
- **Sorgente di ioni**
 - Genera le particelle cariche da accelerare
- **Sistema di estrazione**
 - Guida le particelle fuori dal ciclotrone

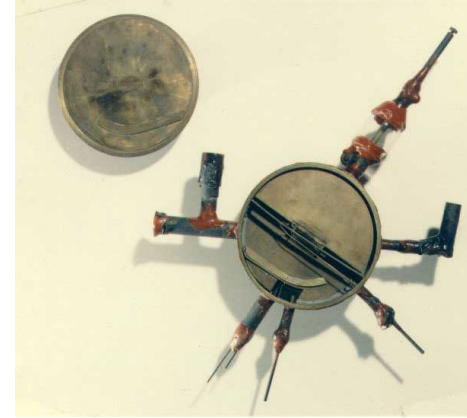


Il ciclotrone classico

- Le particelle cariche si muovono su una traiettoria a spirale.
- La velocità angolare è costante:

$$\omega_{\text{rev}} = \frac{v}{r} = \frac{qB}{m} \quad \Rightarrow \text{indipendente dal raggio, velocità ed energia (in regime non relativistico)}$$

- Accelerazione avviene con un sistema RF operante a frequenza costante $\omega_{\text{RF}} = h \omega_{\text{rev}}$, con h definito numero armonico
- Vale la condizione di **isocronismo**: Una particella arriva sempre alla stessa fase RF al centro del gap accelerante
- Utilizzabile per accelerare protoni fino all'energia di circa 10 MeV

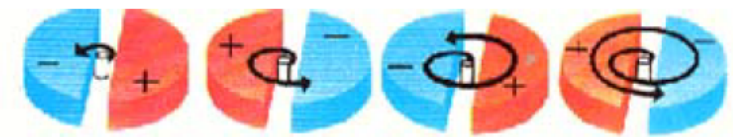


Primo prototipo di ciclotrone (E.O.Lawrence e M.S.Livingston, 1931, Berkeley, CA)

Diametro 4.5 pollici (≈ 11.5 cm)
d.d.p. = 1800 V

Accelerazione di protoni a 80 keV

Nel ciclotrone gli ioni sono immersi in un campo magnetico e seguono traiettorie circolari in due camere di metallo semicircolari chiamate D connesse a un potenziale oscillante. Quando gli ioni sono all'interno dei D sentono solo il campo magnetico e la loro traiettoria è circolare. Nel gap tra i due D vengono accelerati da un campo elettrico. Ad ogni semigioco il campo elettrico tra i D viene invertito.



$$T_{\text{max}} = \frac{R^2 q^2 B^2}{2 m_0}$$

Il ciclotrone classico

Nel ciclotrone classico, un fattore limitante è l'aumento relativistico della massa durante l'accelerazione:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}} = \gamma m_0 \quad \text{with } \gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

L'aumento di m implica una variazione della frequenza di ciclotrone $\omega_{\text{rev}} = \frac{v}{r} = \frac{qB}{m}$

Energia dei protoni	Decremento di ω in %
10 MeV	1%
250 MeV	21%
1 GeV	52%

Si perde la sincronizzazione tra l'oscillazione del campo elettrico e la traiettoria delle particelle.

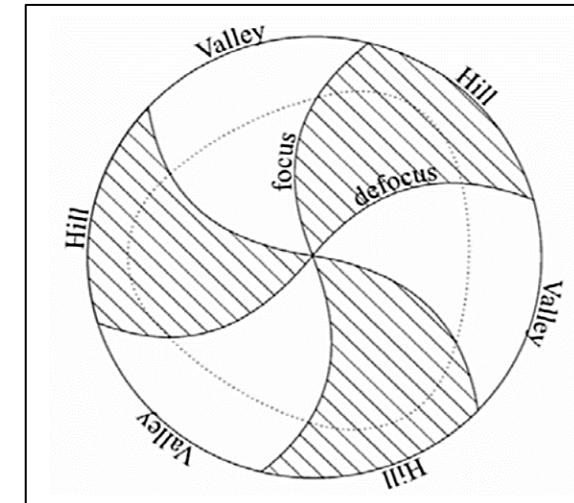
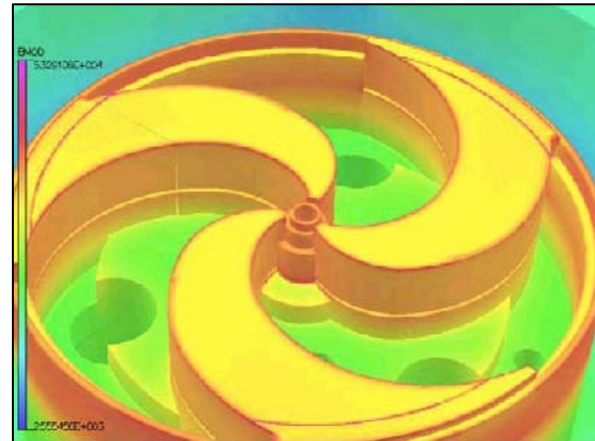
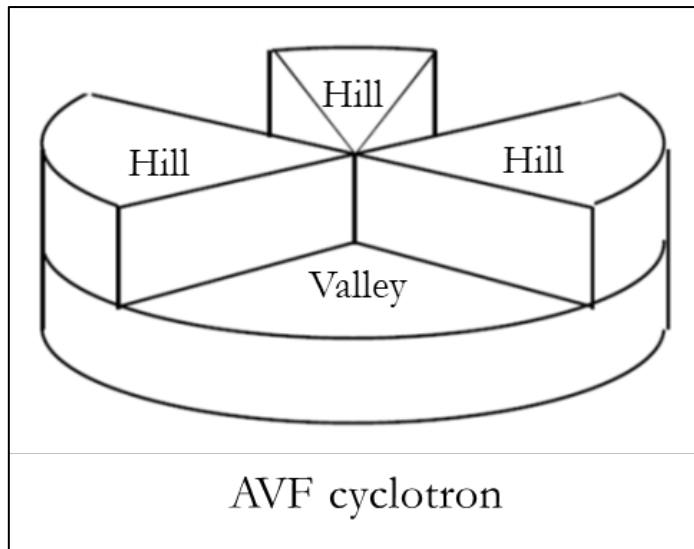
Un modo per ovviare a questo inconveniente è aumentare il campo magnetico all'aumentare di r con una forma opportuna dei magneti:

$$B = \gamma B_0$$

Questo però provoca una defocalizzazione verticale del fascio.

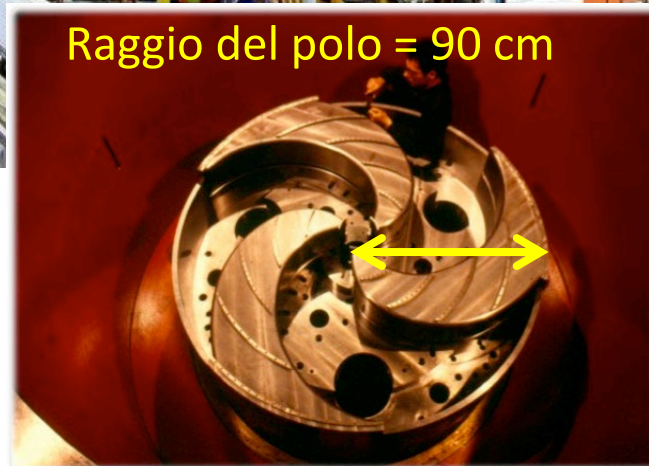
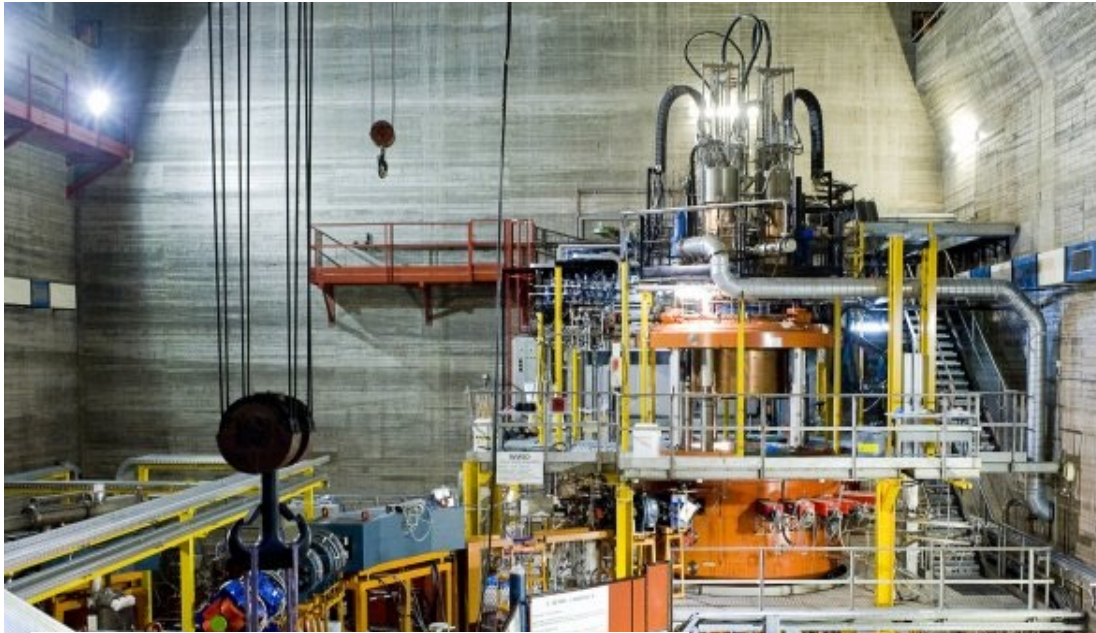
Dal ciclotrone classico al ciclotrone isocrono

- Nel 1938 Thomas propose di realizzare il magnete in settori che generano un campo intenso (**hill**) alternati ad altrettante regioni che generano un campo debole (**valley**).
- Si crea una variazione azimutale di campo magnetico che fornisce la focalizzazione verticale del fascio di particelle.
- Il ciclotrone prende il nome di **ciclotrone AVF (Azimuthally Varying Field)** o **ciclotrone isocrono**.



Settore a spirale per aumentare ulteriormente l'effetto di focalizzazione verticale del fascio di particelle

Il ciclotrone superconduttore dei LNS



- Peso: **176 Tonnellate**
- Ioni: H_2^+ - ^{208}Pb
- Energia: 10-80 AMeV
- Corrente: 0.04 nA-decine di μA
- Campo magnetico max:
4.8 T (quasi centomila volte il campo terrestre)
- Magnete Superconduttore in Niobio-Titanio
raffreddato a $-270\text{ }^\circ C$
- Tensione applicata agli elettroni: fino a **80 kV**

Progetto di upgrade del ciclotrone per aumentare l'intensità di corrente di diversi ordini di grandezza

Grazie per l'attenzione