

Fisica degli acceleratori

Grazia D'Agostino
INFN-LNS



- Principi e concetti fondamentali
 - Definizione e caratteristiche principali 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

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 .

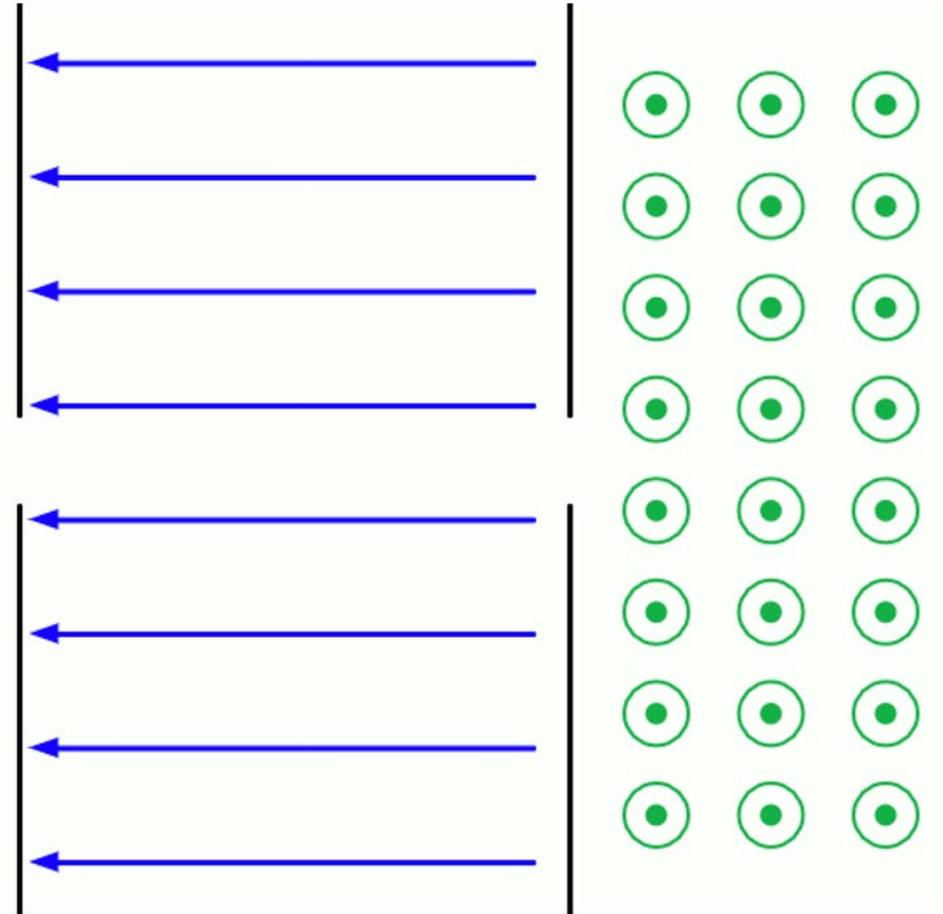
$$\mathbf{F}_e = q\mathbf{E}$$

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.

Carica negativa



Campi magnetici ed elettrici sono utilizzati per:

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

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

Campo E

Campo B
(uscente dal piano)

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

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

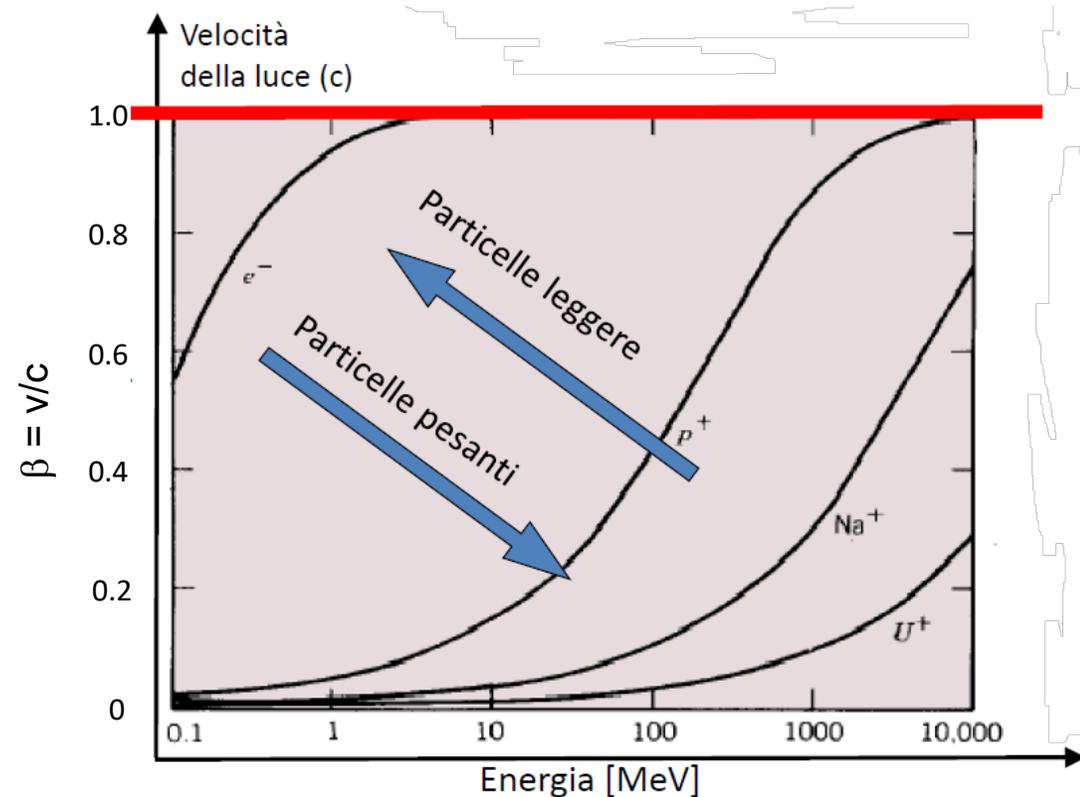
$$E_{\text{kin}} = m_0 c^2 (\gamma - 1) = m_0 \gamma c^2 - E_0$$

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



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 delle particelle si usa normalmente l'**elettronvolt** e i suoi multipli.

L' elettronvolt e i suoi multipli

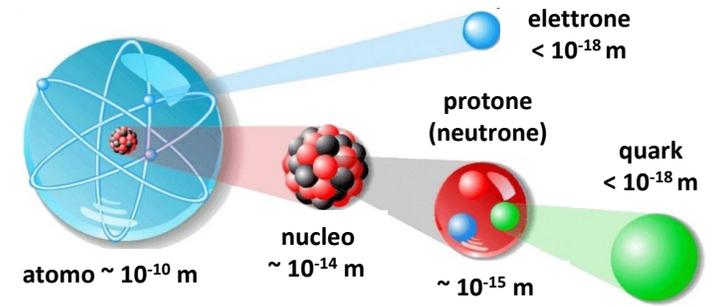
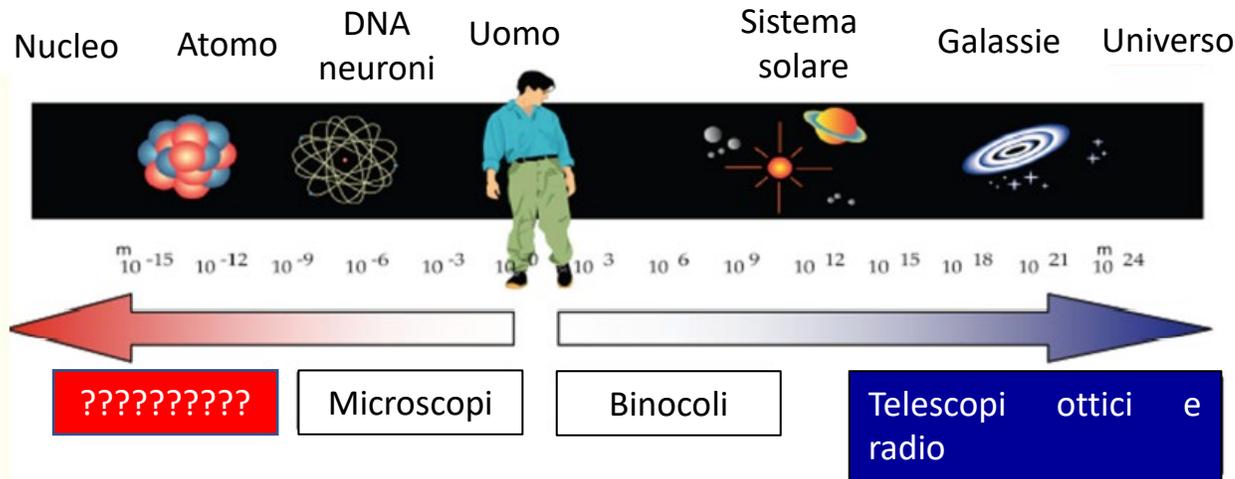
1 eV	10^3 eV	10^6 eV	10^9 eV	10^{12} eV
1 eV	1 keV	1 MeV	1 GeV	1 TeV

- L'elettronvolt è l'energia cinetica acquisita da un elettrone sottoposto a una differenza di potenziale di 1 volt.

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

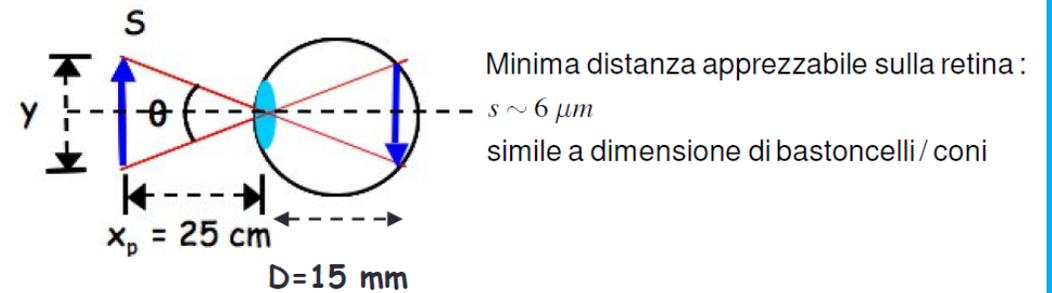
- Le energie di legame degli elettroni atomici sono nell'ordine degli eV, mentre quelle per rimuovere un protone o un neutrone da un nucleo sono nell'ordine dei MeV.

Come studiare l'infinitamente piccolo?



Come *osservare* sistemi così piccoli?

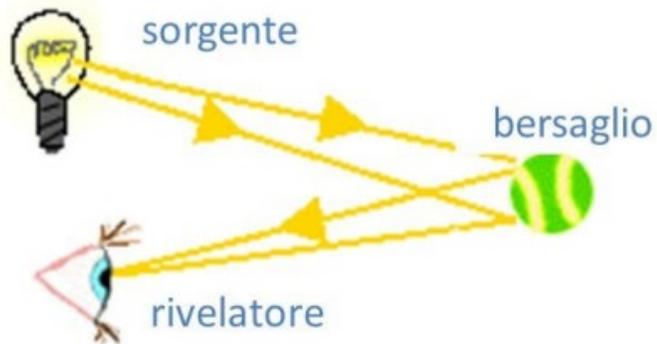
Limite di osservabilità dell'occhio umano:



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

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

L'occhio umano è un rivelatore di fotoni



Come studiare l'infinitamente piccolo?

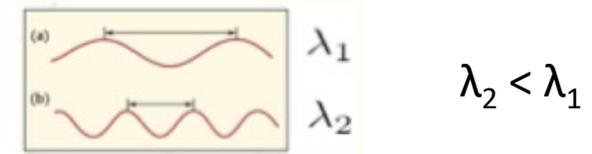
Meccanica quantistica:

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

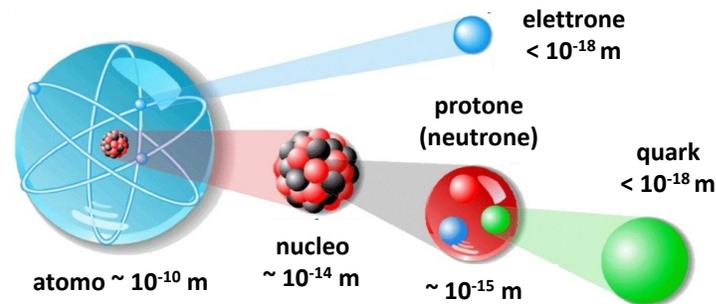


Per vedere una struttura di dimensione k , occorre una "sonda" di lunghezza d'onda $\lambda \ll k$.

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 andare a 10^{-14} - 10^{-18} m \rightarrow **Particelle ad alta energia**

Dove troviamo particelle ad alta energia?

Sorgenti radioattive:

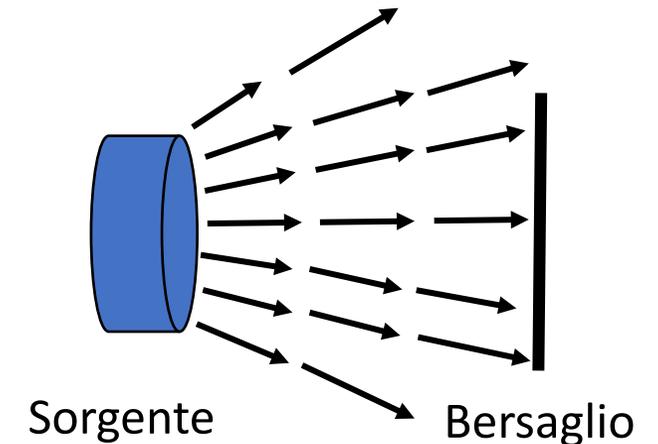
Nuclei pesanti (= con molti protoni e neutroni) che hanno una struttura instabile ed emettono particelle portandosi in una forma più stabile



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:

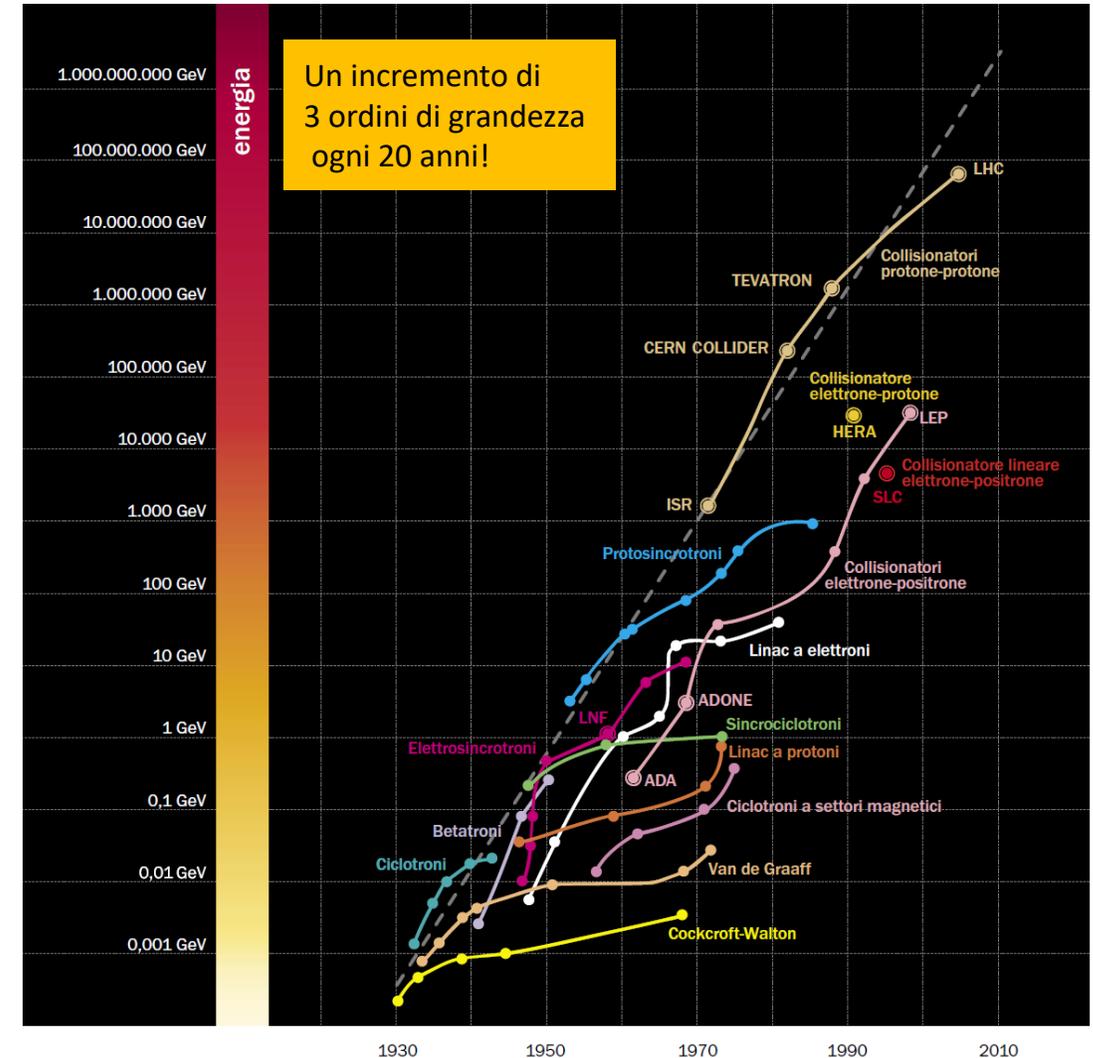
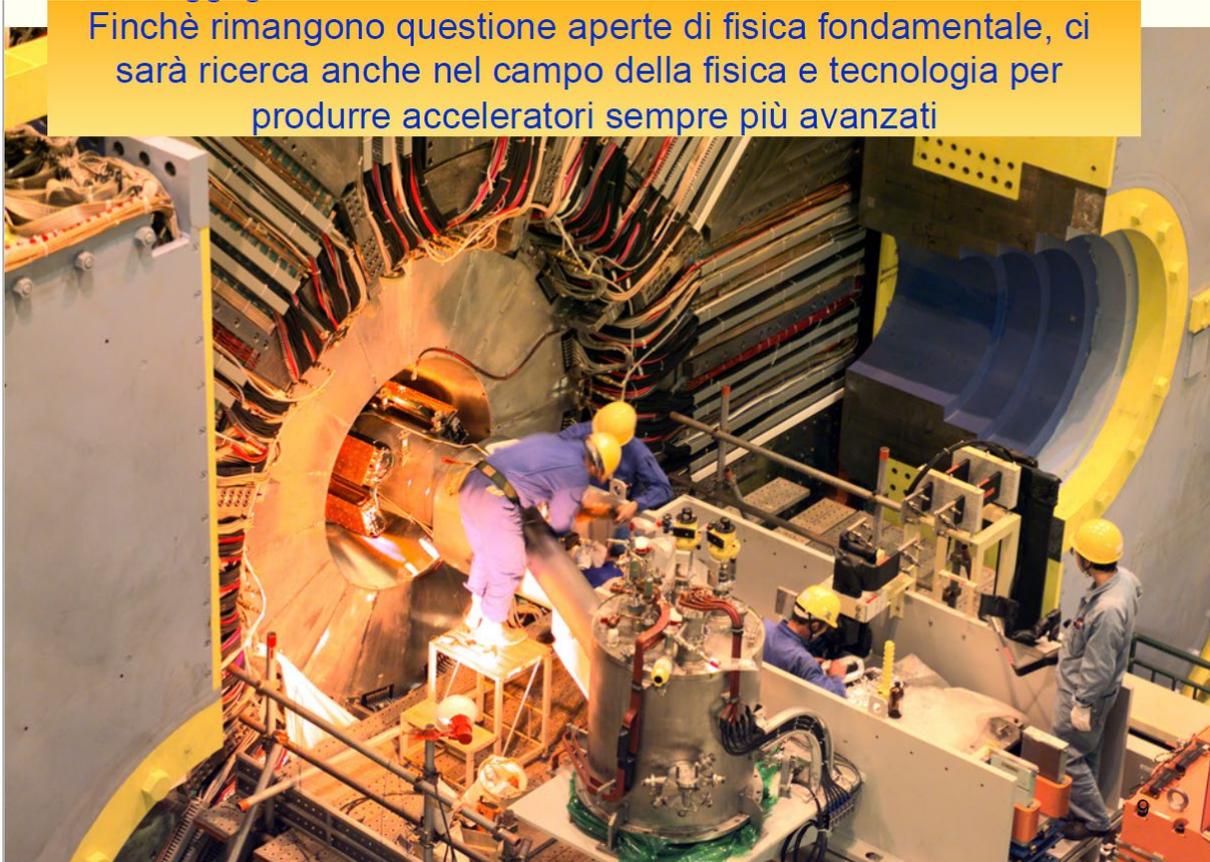
- **acceleratori a bersaglio fisso**
- **acceleratori a collisione (colliders)**

Tra gli acceleratori a bersaglio fisso si distinguono:

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

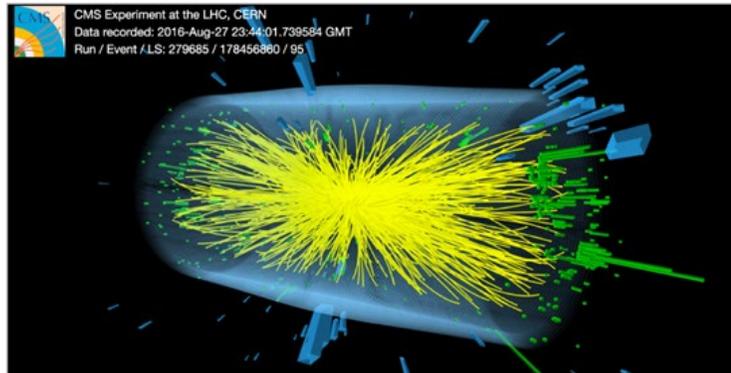
Sviluppo degli acceleratori di particelle

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



Applicazioni degli acceleratori di particelle

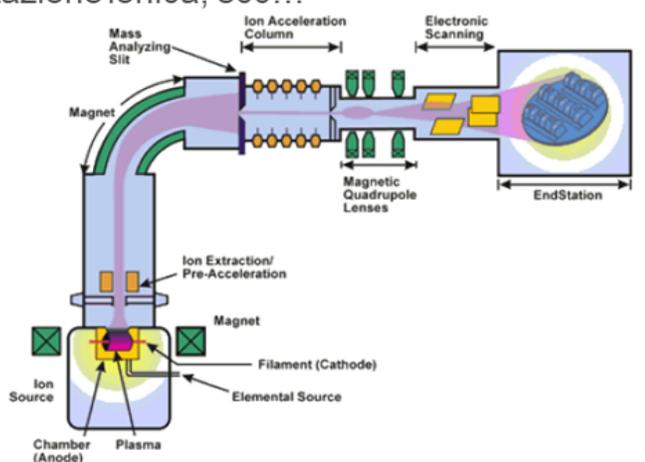
Fisica nucleare e subnucleare: studiare l'infinitamente piccolo



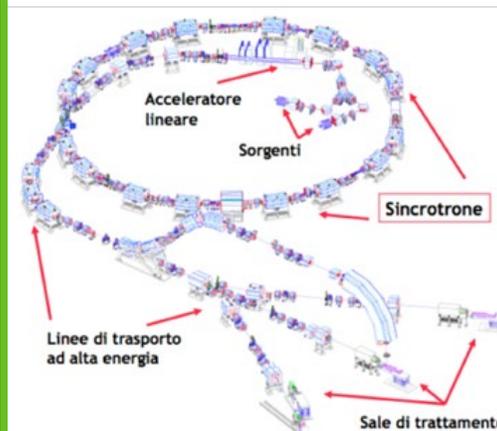
Fisica della materia: sorgenti di radiazione per lo studio della struttura della materia e le sue proprietà



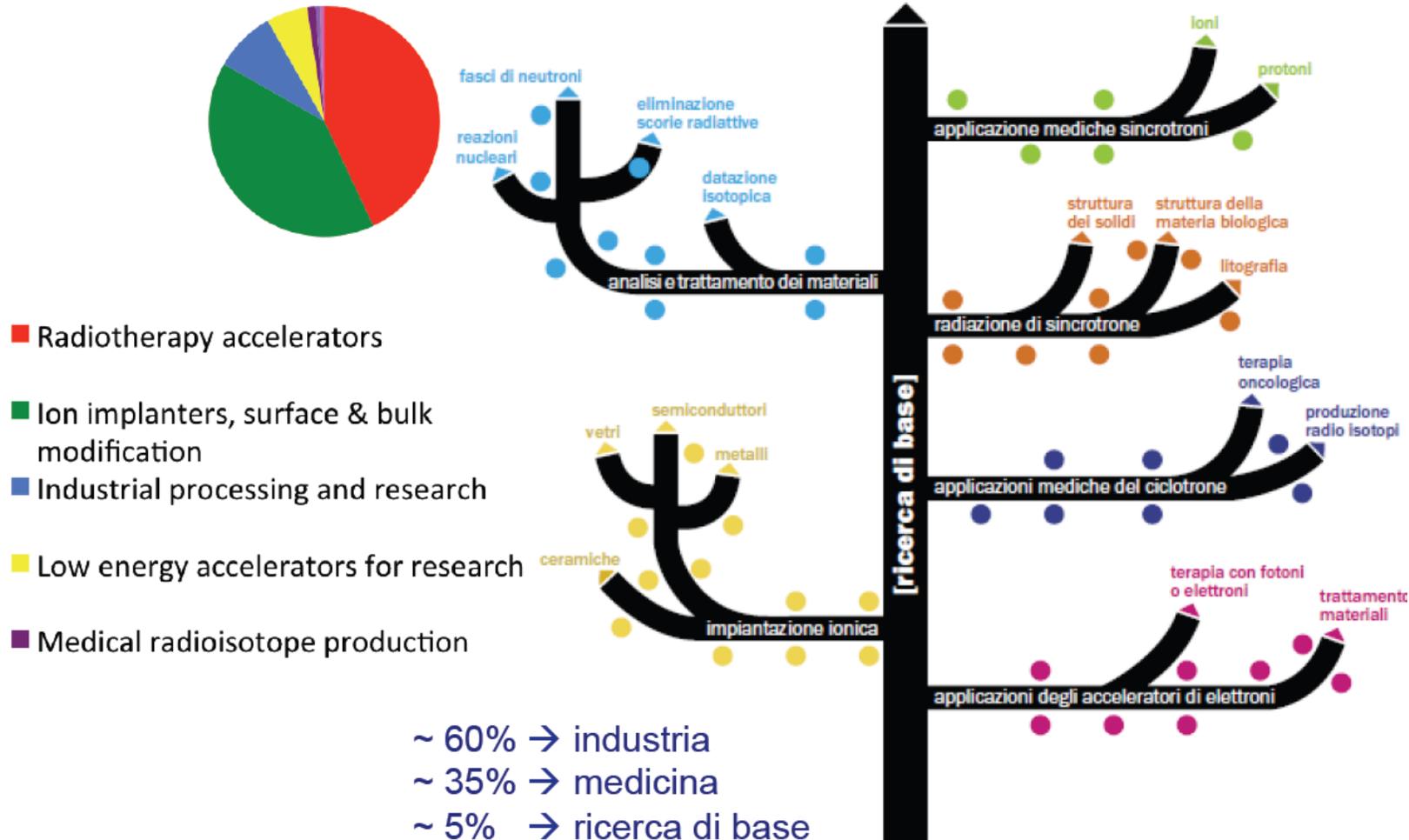
Applicazioni industriali: sterilizzazione dei materiali, impiantazione ionica, ecc...



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



Principali settori applicativi dei > 30000 acceleratori nel mondo

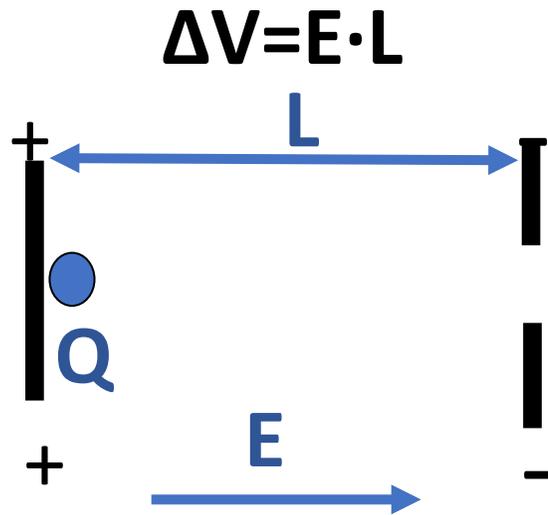


Gli acceleratori elettrostatici

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.

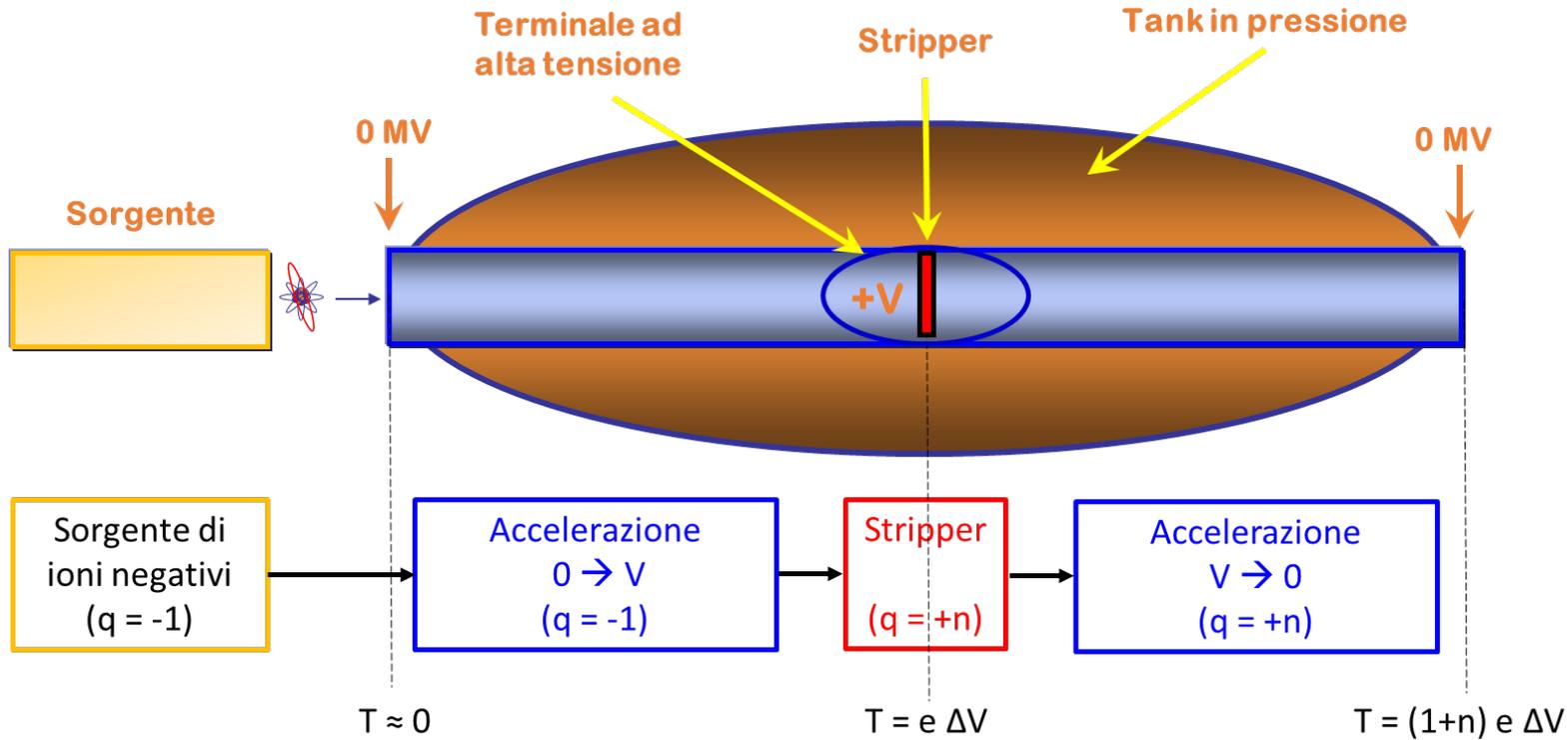


$$E_{\text{cin}} = \Delta V \cdot Q$$

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

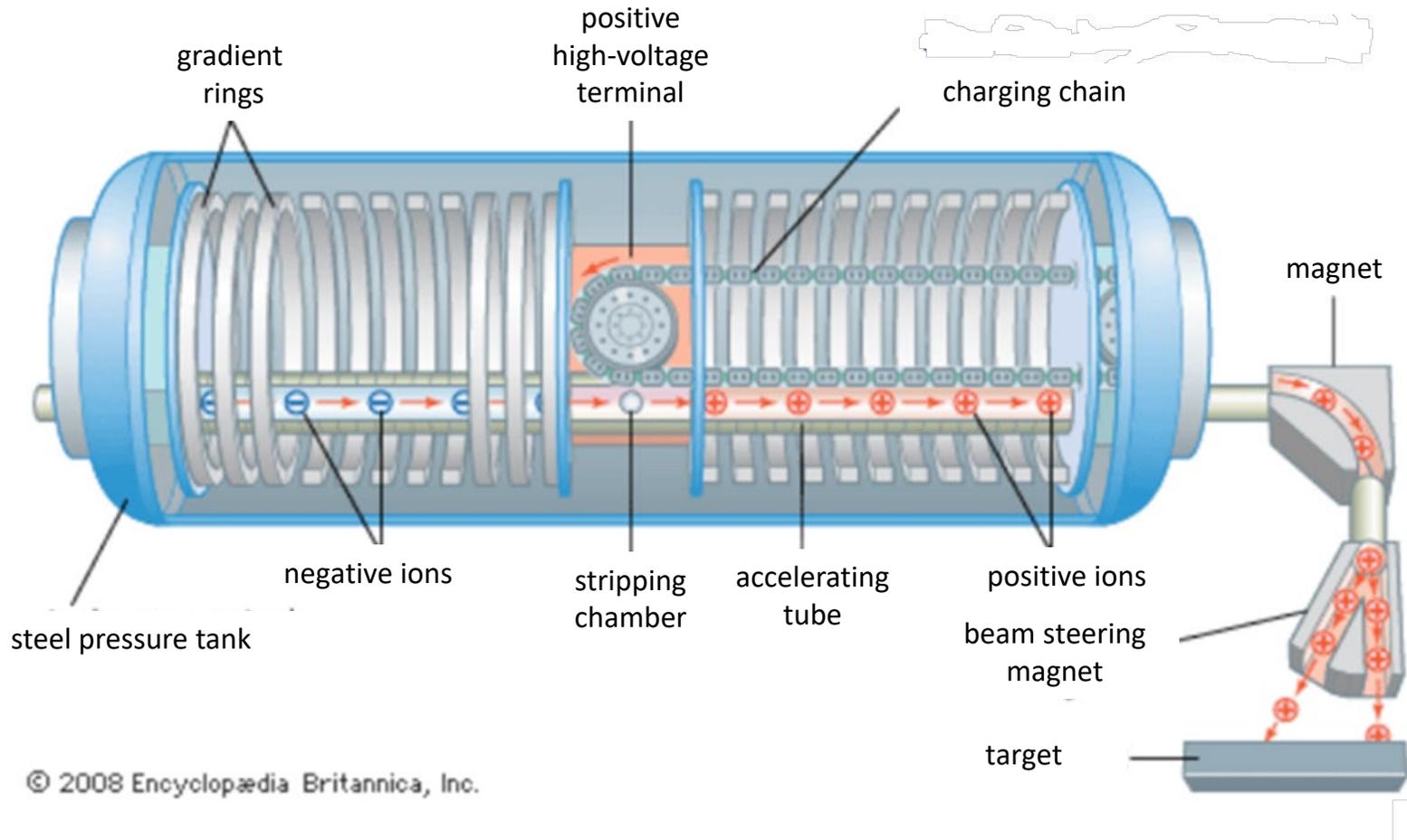


$$T_{fin} = 1e \Delta V + ne \Delta V = (1+n) e \Delta V$$

^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 ($V \sim 15 \text{ MV}$)
- 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



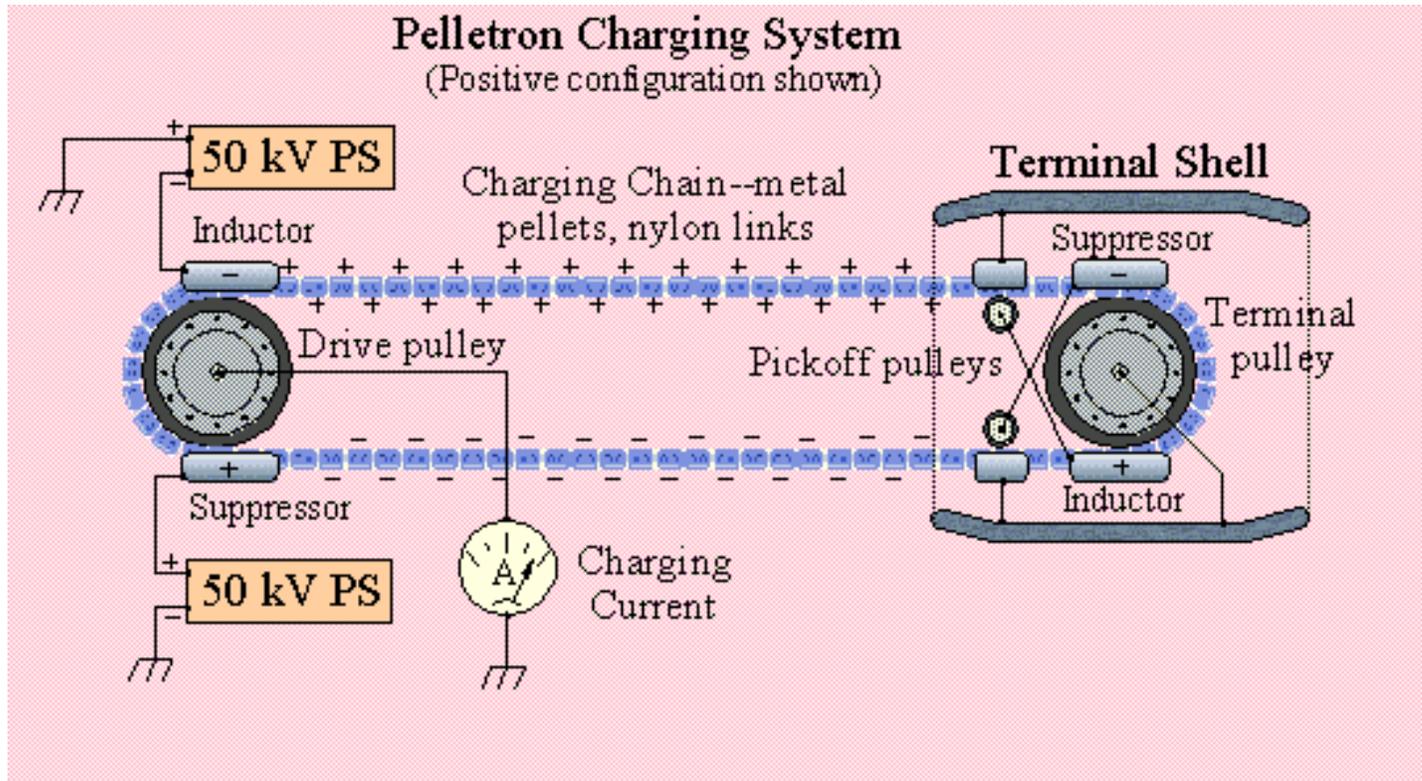
© 2008 Encyclopædia Britannica, Inc.

Elementi costituenti :

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

Seminario
Dott. Castro
08/11/2023

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

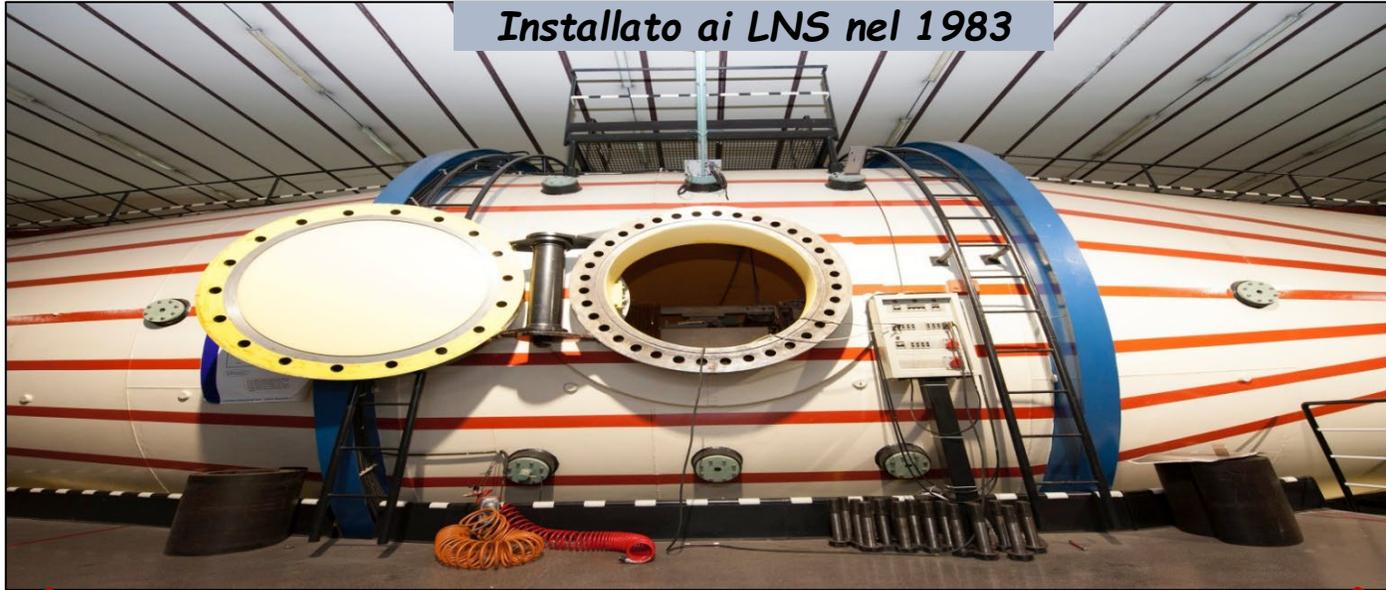
→ Sistema di ricircolazione ed essiccazione del gas

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

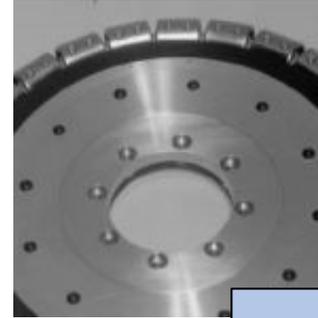
Energia: fino a 200 MeV

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

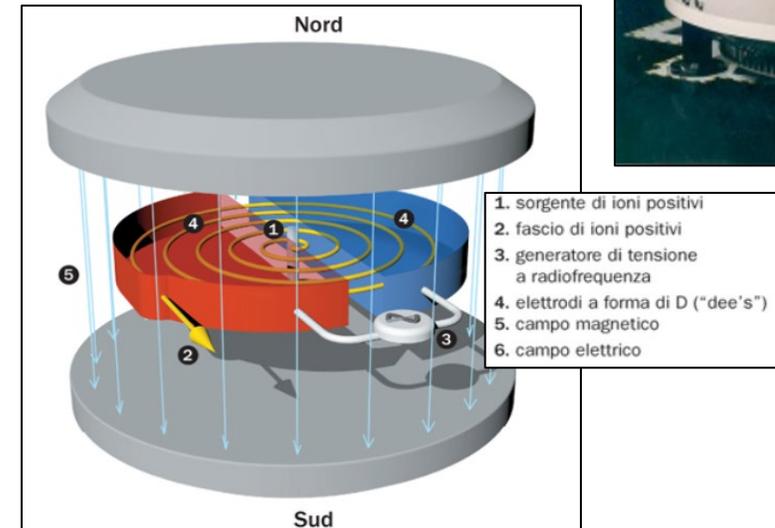
Il ciclotrone

- 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

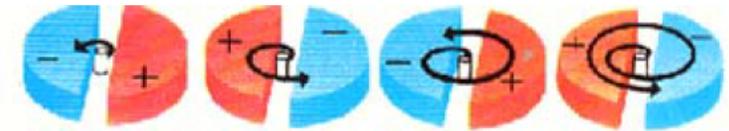


Primo prototipo di ciclotrone (E.O.Lawrence e M.S.Livingston, 1931, Berkeley, CA)

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.

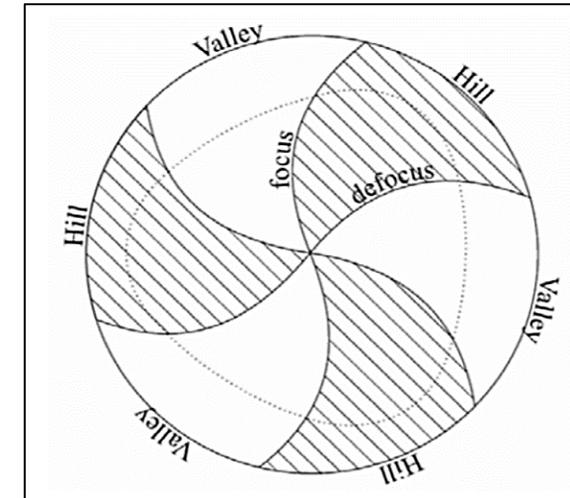
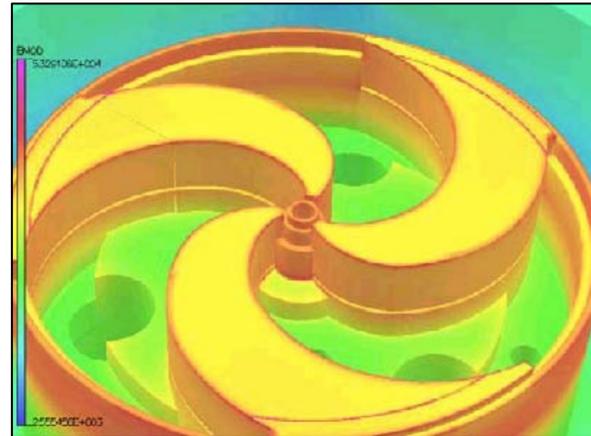
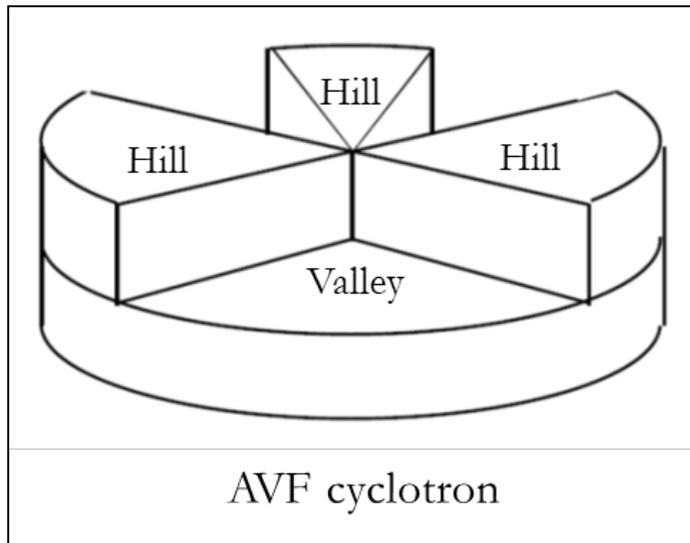
Un modo per ovviare a questo inconveniente è aumentare il campo magnetico all'aumentare di r con una forma opportuna dei magneti:

$$B = \gamma B_0$$

Questo però provoca una defocalizzazione verticale del fascio.

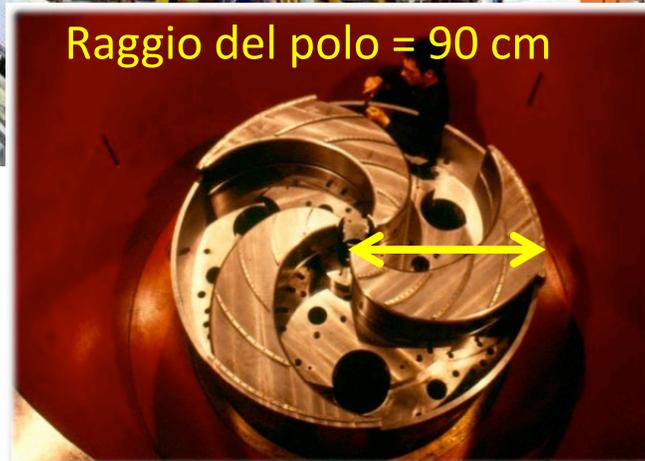
Dal ciclotrone classico al ciclotrone isocrono

- 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