

La fisica degli acceleratori di particelle

Giulio Stancari
Fermilab

Incontri di Fisica 2020
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare
Laboratori Nazionali di Frascati
6 novembre 2020

www.lnf.infn.it/edu/incontri/2020

Struttura dell'incontro di oggi

- Considerazioni generali
- Concetti fondamentali
- Evoluzione storica
- Applicazioni
- Spunti per la didattica
- Risorse per approfondire

Faremo un paio di pause tra gli argomenti principali e alla fine dell'incontro per domande e commenti

Perché studiare la fisica degli acceleratori?

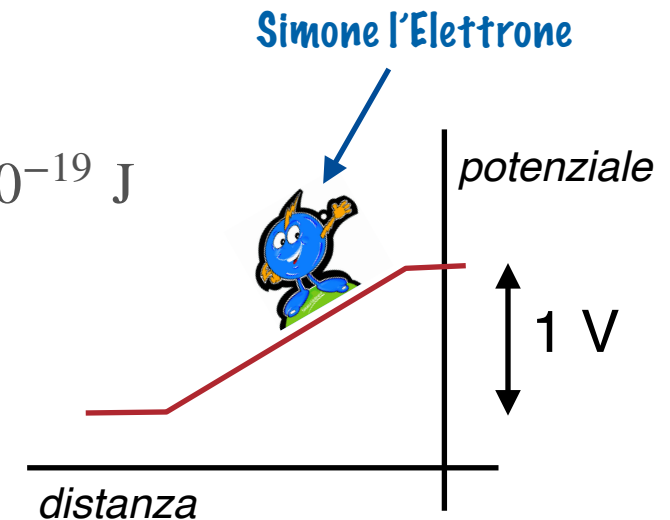
- **Scienza**: strumenti fondamentali per scoperte scientifiche in fisica nucleare e sub-nucleare, chimica, biologia, ecc.
- **Applicazioni**: diagnostica medica e terapie, processi industriali, tecnologie innovative
- **Società**: collaborazioni internazionali avvicinano persone di diverse culture
- **Settore interdisciplinare**: matematica, fisica, ingegneria, informatica — persone con talenti diversi possono contribuire e trovare la loro vocazione
- **Sviluppo professionale**: esistono ottimi corsi, tirocini e possibilità di lavoro per i giovani più promettenti

Principi e concetti fondamentali

Unità di energia

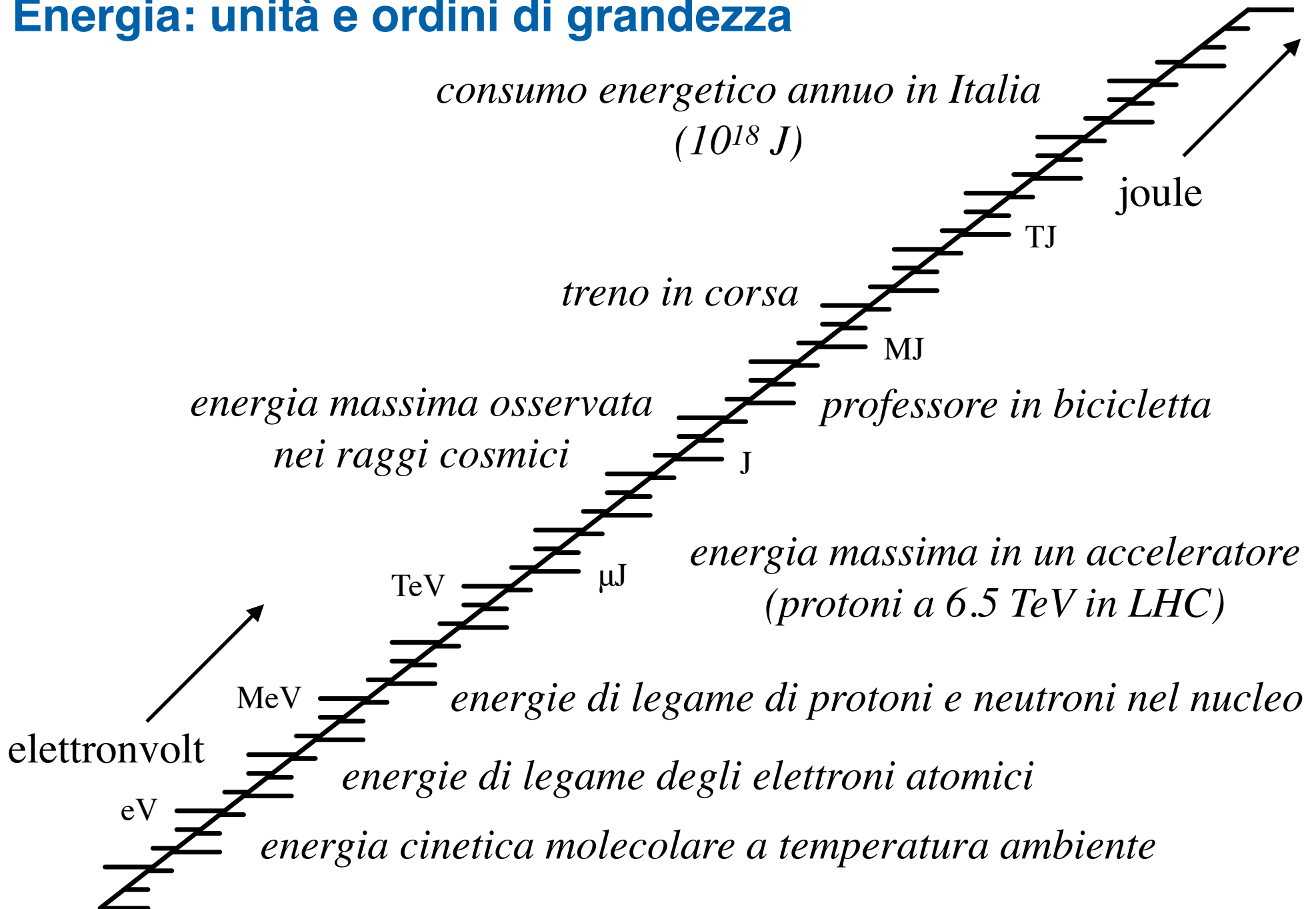
- L'elettronvolt (eV) è un'utile unità di energia
- È l'energia cinetica acquisita da un elettrone in una differenza di potenziale di 1 volt:

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

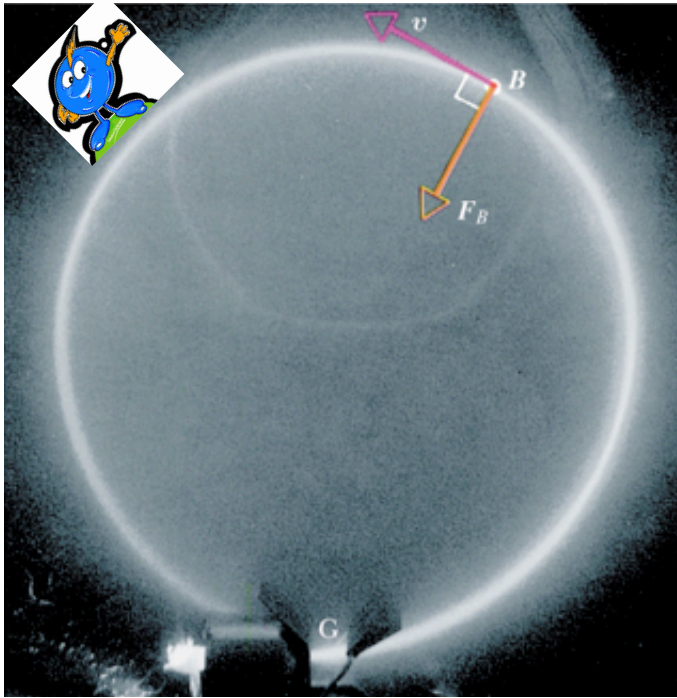


- Multipli sono il keV (10^3 eV), MeV (10^6 eV), GeV (10^9 eV), TeV (10^{12} eV), ecc.

Energia: unità e ordini di grandezza



Particella carica in campo elettromagnetico: forza di Lorentz



*Sorgente di elettroni da 1 keV
in campo magnetico di 1 mT.
Raggio di curvatura 11 cm.*

$$\mathbf{F} = q \cdot (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

- **Campi elettrici** usati per accelerare e deflettere

- **Campi magnetici** statici possono soltanto deflettere (forza perpendicolare alla velocità)
- Efficaci ad alte energie (forza proporzionale alla velocità)

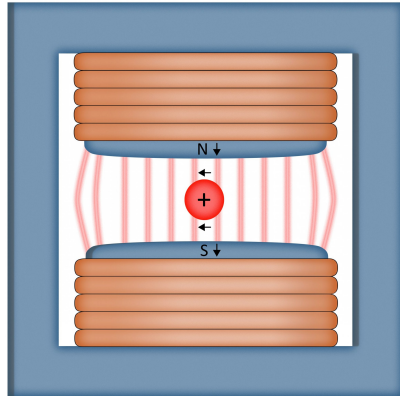
raggio di curvatura

$$\rho = \left(\frac{p}{q} \right) \cdot \frac{1}{B}$$

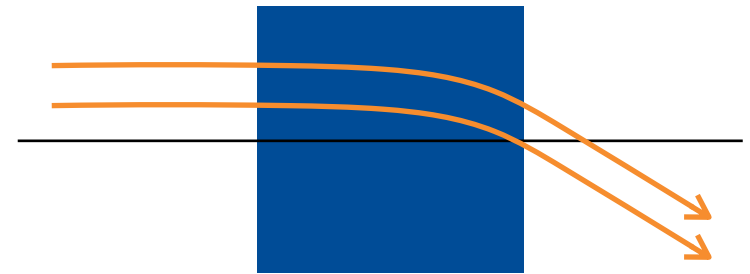
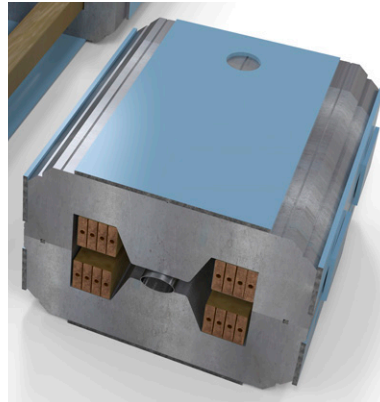
rigidità magnetica (“B rho”)
della particella: impulso / carica

Funzioni di base dei magneti

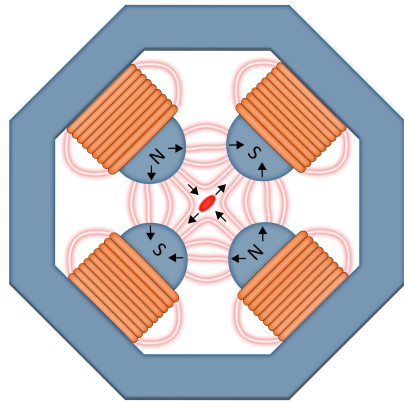
Magnete dipolare o **dipolo**: “prisma magnetico”, deflessione



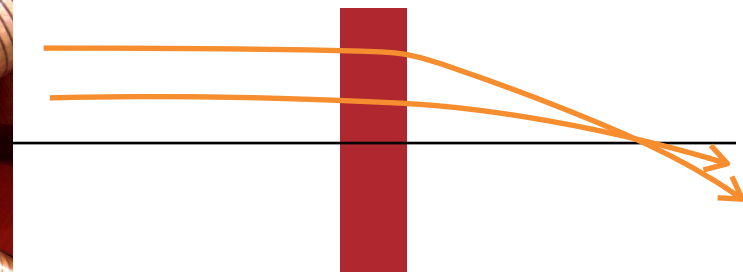
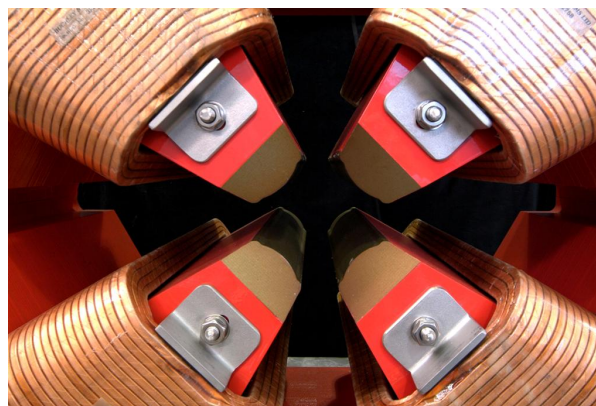
campo costante



Magnete quadrupolare o **quadrupolo**: “lente magnetica”, focalizzazione



campo proporzionale
alla distanza dall'asse



Intensità, sezioni d'urto, luminosità

Relazione essenziale per il **progetto** e l'**analisi degli esperimenti**,
sia su **bersaglio fisso** che **in movimento**

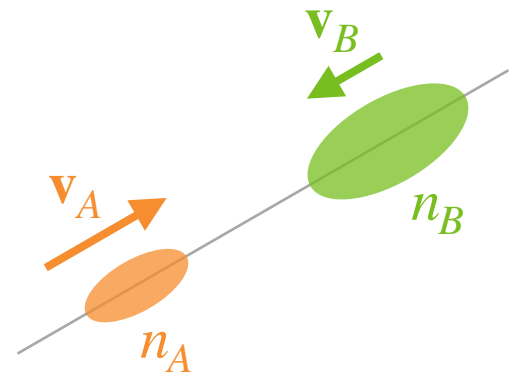

$$\Delta N = \epsilon \cdot \sigma \cdot \boxed{v \cdot n_A \cdot n_B \cdot \Delta V} \cdot \Delta t$$

Diagram illustrating the relationship between the number of observed events (ΔN) and the luminosity (\mathcal{L}), which is the product of the interaction volume (ΔV) and the densities of the colliding particles (n_A and n_B).

The equation is:

$$\Delta N = \epsilon \cdot \sigma \cdot \mathcal{L} \cdot \Delta t$$

Where:

- ΔN : numero di eventi osservati
- ϵ : efficienza del rivelatore
- σ : sezione d'urto del processo (invariante)
- \mathcal{L} : luminosità (highlighted in the diagram)
- v : fattore cinematico
- n_A : densità (for particle A)
- n_B : densità (for particle B)
- ΔV : volume di interazione
- Δt : tempo di interazione

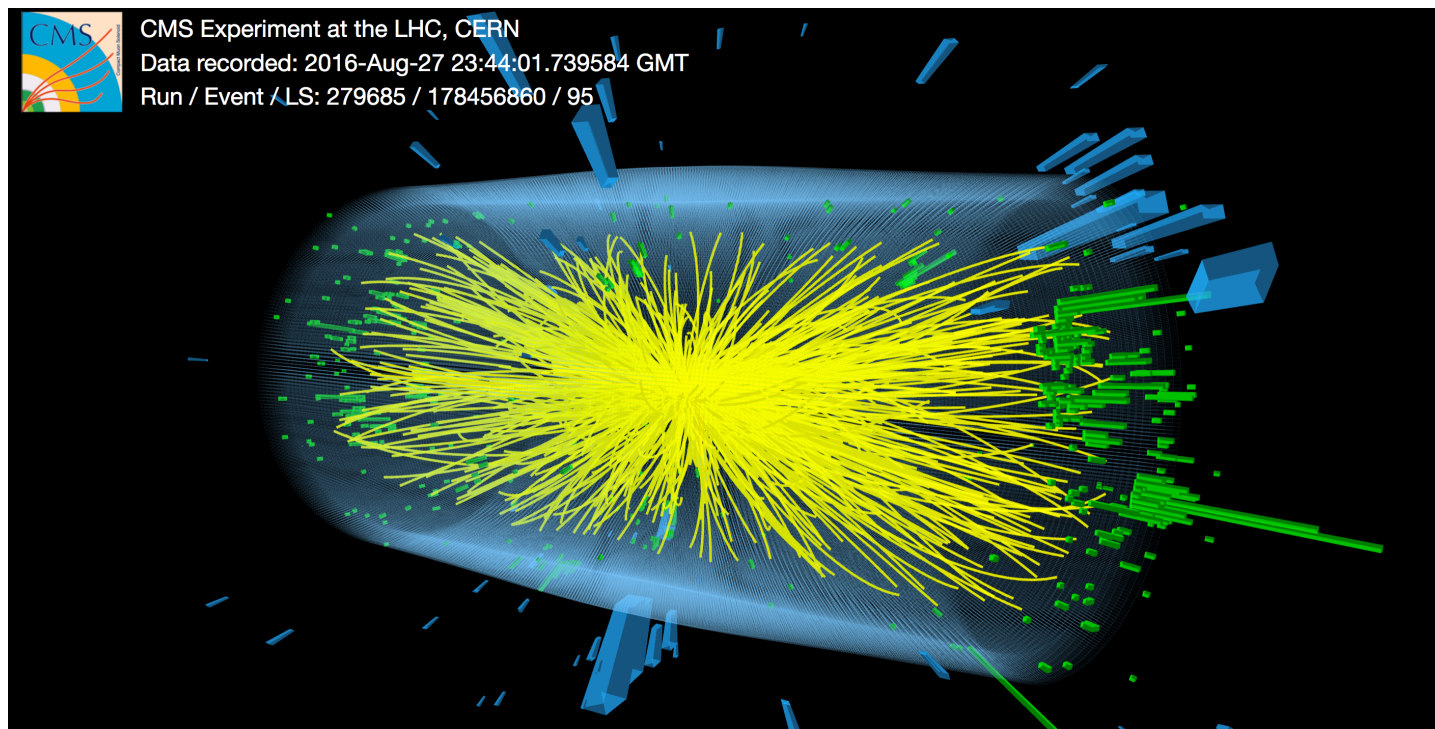
The relative velocity v is defined as:

$$v = \sqrt{(\mathbf{v}_A - \mathbf{v}_B)^2 - (\mathbf{v}_A \times \mathbf{v}_B)^2 / c^2}$$

Evoluzione degli acceleratori

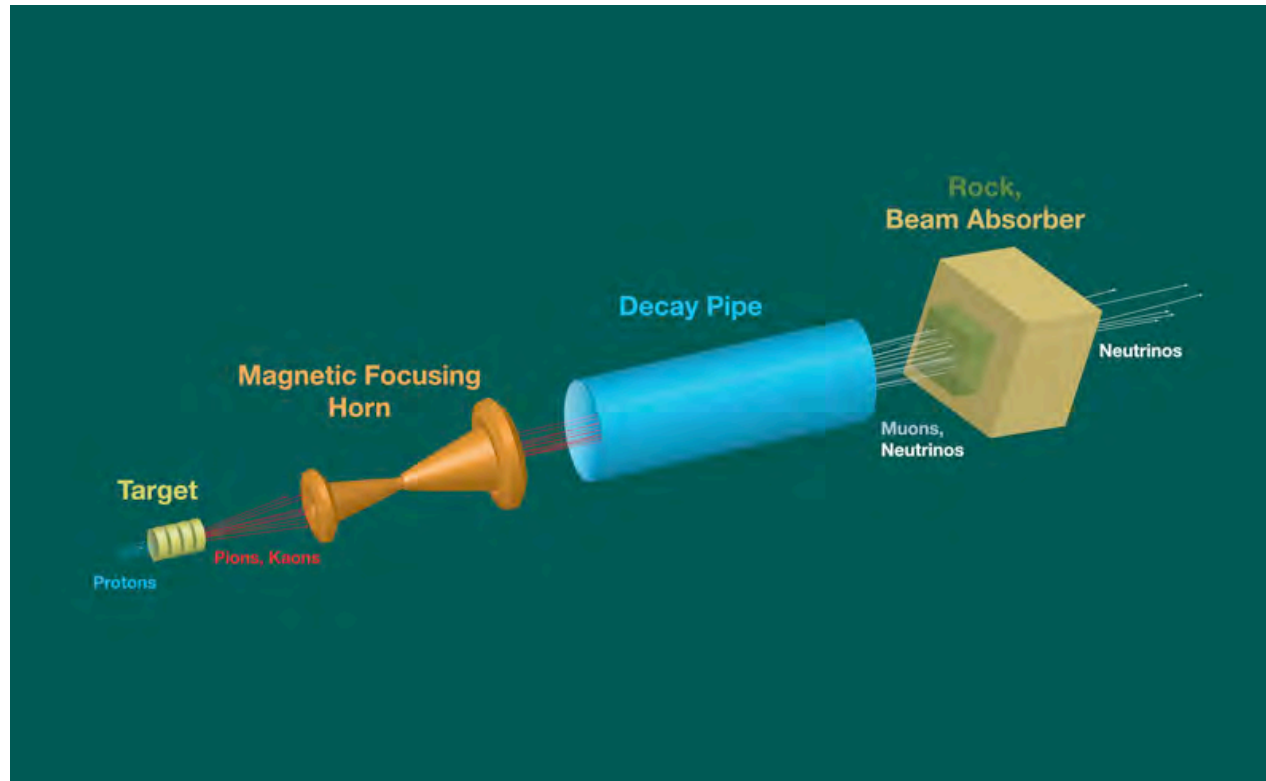
Perché accelerare? E come?

1. Il sorprendente fenomeno di **conversione dell'energia cinetica in massa** ($E = mc^2$) permette di scoprire e studiare diverse forme di materia



Perché accelerare? E come?

2. Fasci primari di particelle energetiche vengono utilizzati per creare **fasci secondari intensi e collimati che non esistono in natura**: pioni, muoni, antiprotoni, positroni, fotoni, neutrini, ecc.

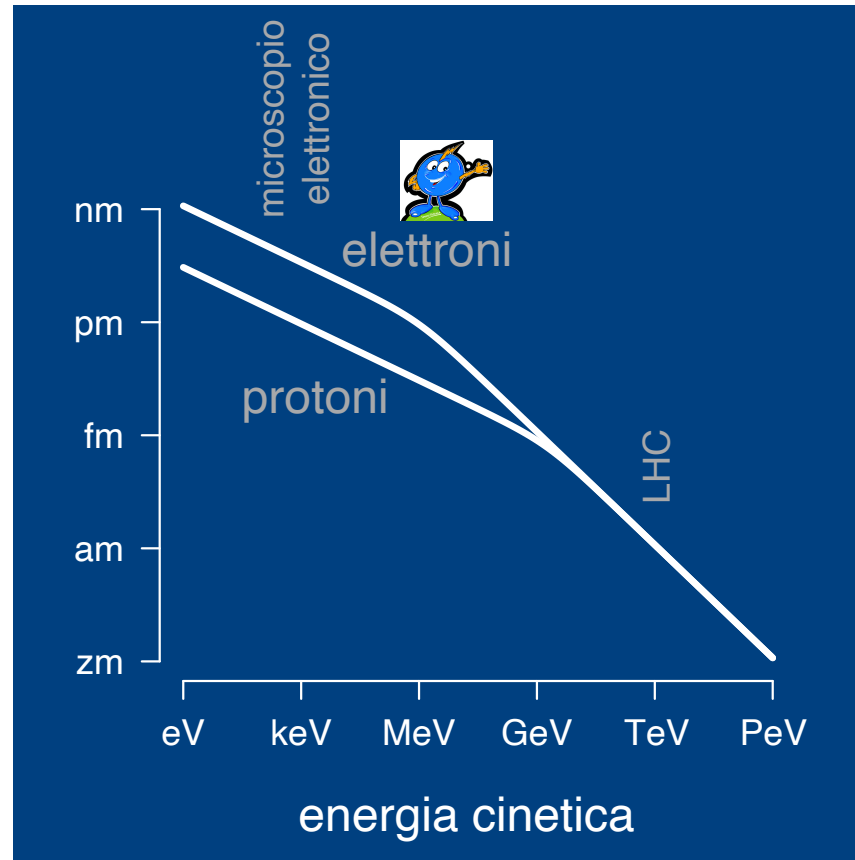


Perché accelerare? E come?

3. Le particelle elementari servono da **sonde per il mondo microscopico** sia attraverso la loro **natura corpuscolare** che **ondulatoria**

Lunghezza d'onda
di De Broglie

$$\lambda = \frac{h}{p}$$



proteine

atomi

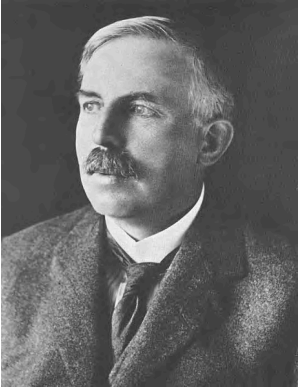
nuclei

quark e gluoni

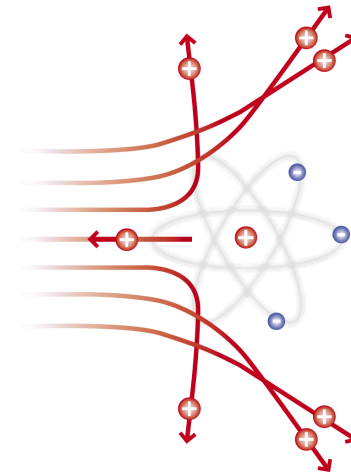
?

mesoni, Higgs ?
barioni

Rutherford: il nucleo e il desiderio di sorgenti più intense



Particelle alfa da decadimento radioattivo su oro:
scoperta del nucleo atomico



Particelle alfa su azoto gassoso:
trasmutazione (trasformazione in ossigeno)

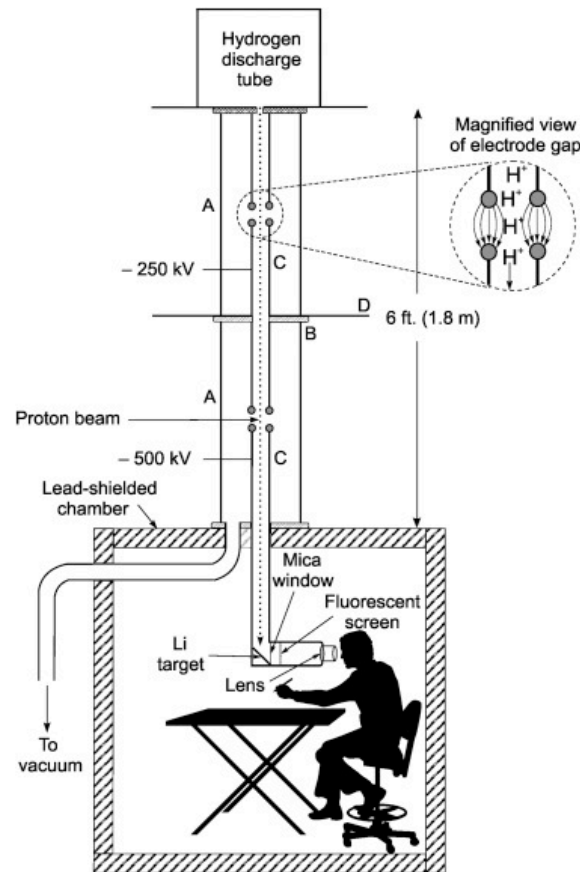
Necessità di sorgenti più energetiche e intense:

"It has long been my ambition to have available for study a copious supply of atoms and electrons which have an individual energy far transcending that of the α and β -particles from radioactive bodies. I am hopeful that I may yet have my wish fulfilled, but it is obvious that many experimental difficulties will have to be surmounted before this can be realised on a laboratory scale."

-Rutherford, Proc. Royal Society, 1927

Metodo diretto di accelerazione: produzione di alte tensioni

Cockcroft e Walton al Cavendish Laboratory (1932) producono alte tensioni con trasformatore, condensatori e diodi (moltiplicatore di Greinacher)

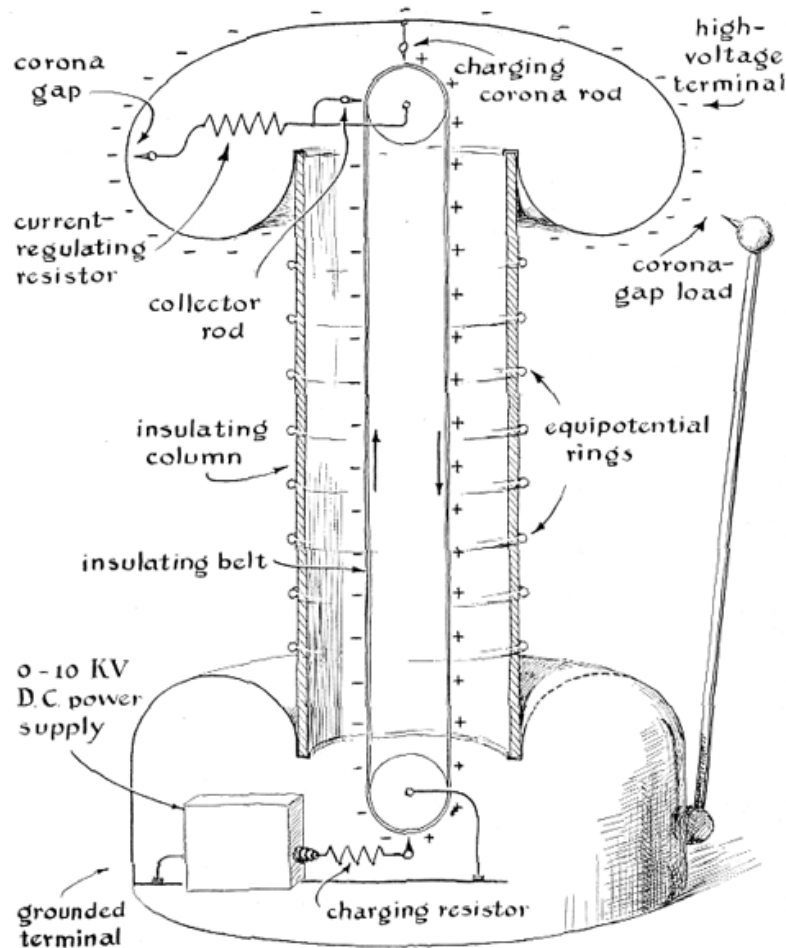


Protoni accelerati fino a 600 keV sono sufficienti per vincere la barriera coulombiana (repulsione nucleare)

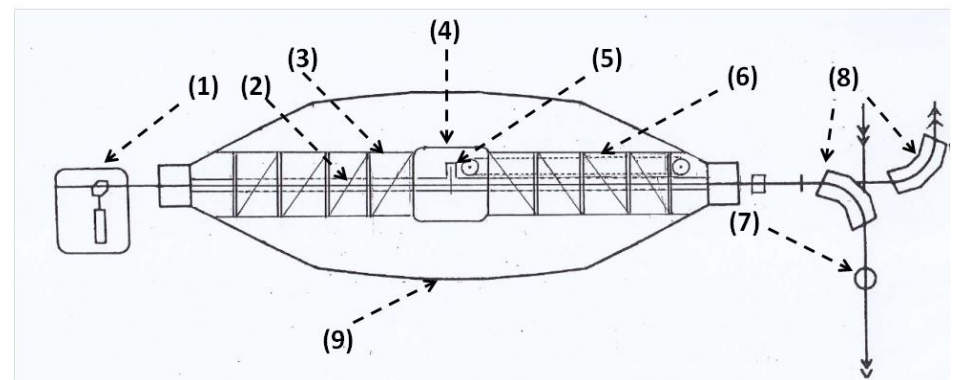
Prima trasmutazione artificiale! Parte del bersaglio di litio viene trasformata in berillio

Metodo diretto di accelerazione: produzione di alte tensioni

Il generatore di Van de Graaf (1929) converte il lavoro meccanico necessario a muovere una cinghia carica in potenziale elettrico

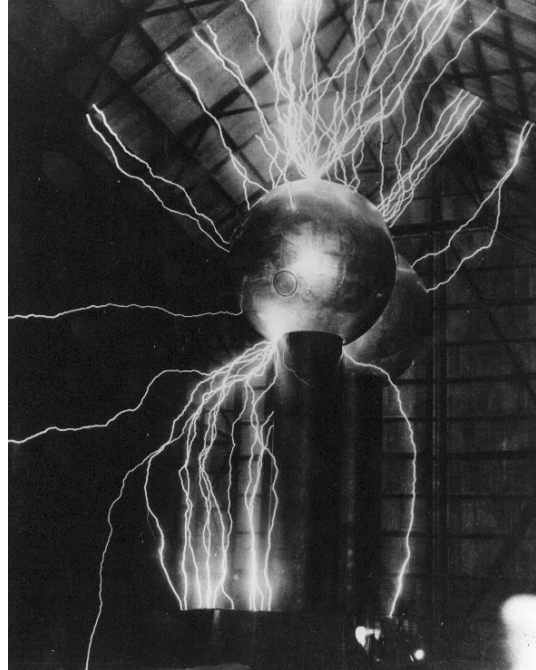


Tandem/XTU (15 MV) ai Laboratori Nazionali di Legnaro dell'INFN



Vantaggi e limiti delle macchine elettrostatiche

- Energie fino a ~ 100 MeV adatte allo studio dei processi nucleari
- Stabilità della tensione importante per misure di sezioni d'urto in funzione dell'energia del fascio
- Intensità fino a ~ 0.1 mA
- Possono raggiungere alcuni megavolt prima di produrre scariche
- Come andare oltre?

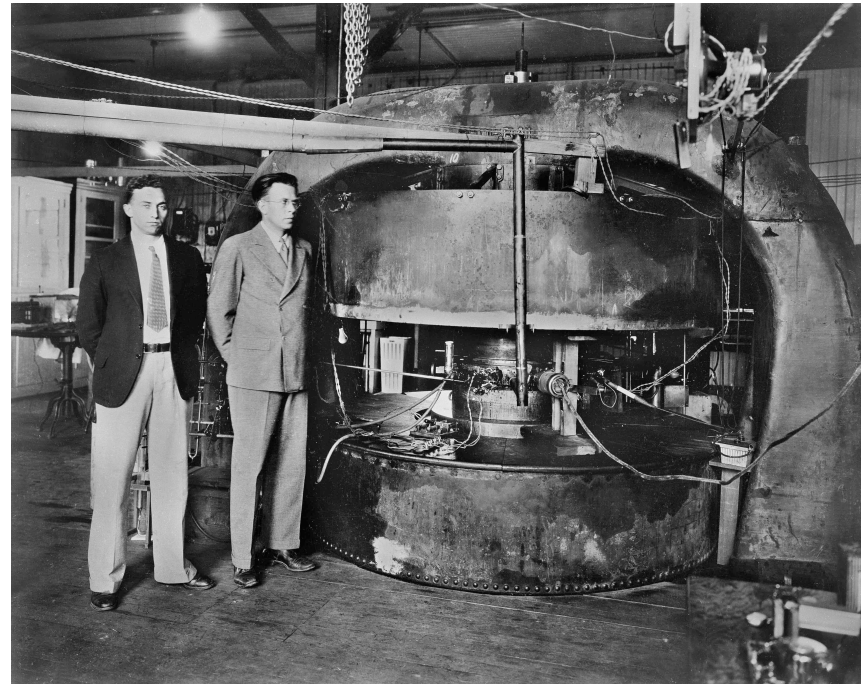


AT ROUND HILL SPARKING TO HANGAR (LONG EXPOSURE)

©MIT Museum All rights reserved

Accelerazione multipla: il ciclotrone

- Per evitare alte tensioni, diversi scienziati (Ising, Widerøe, Gabor, Szilard, Steenbeck) suggeriscono
 1. Piccole accelerazioni, ripetute molte volte
 2. Ricircolo del fascio di particelle
- Lawrence e Livingston costruiscono a Berkeley i primi ciclotroni (1930)

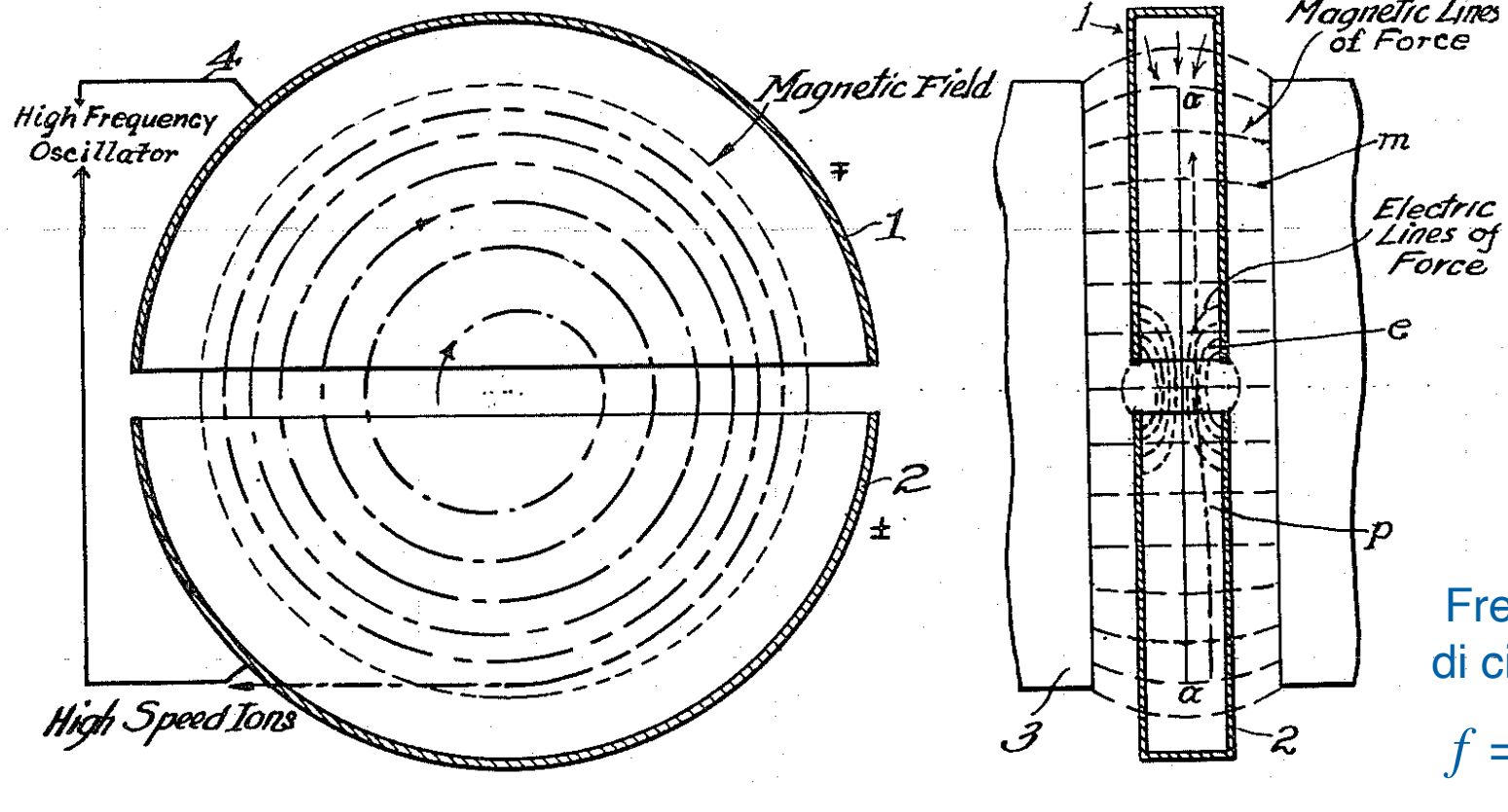


Accelerazione multipla: il ciclotrone

Campo elettrico alternato
accelera le particelle

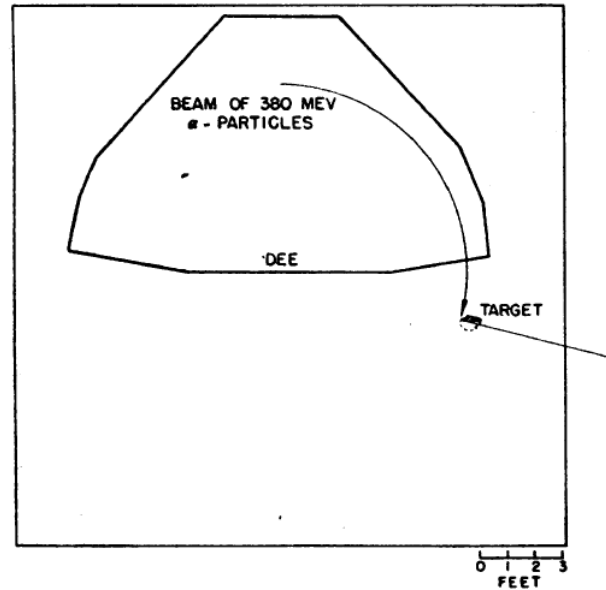
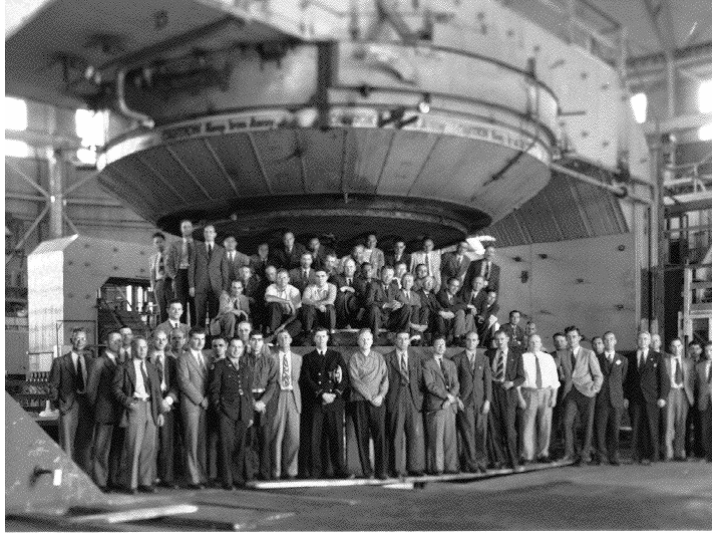
Campo magnetico confina
le particelle su orbite a spirale

Focalizzazione “debole” tramite
la curvatura delle linee di campo

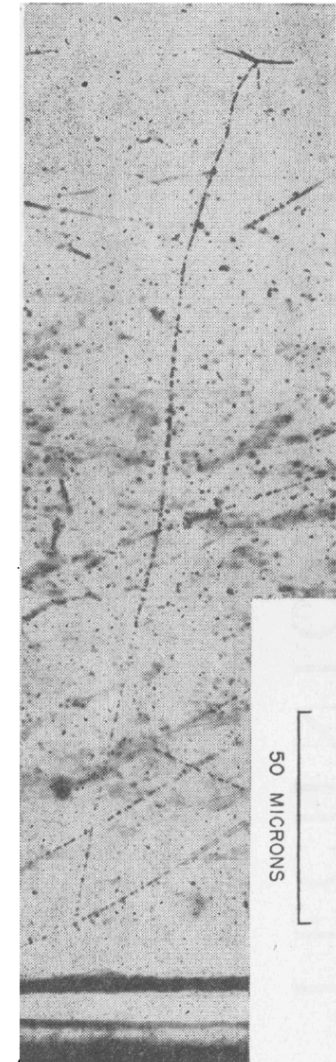
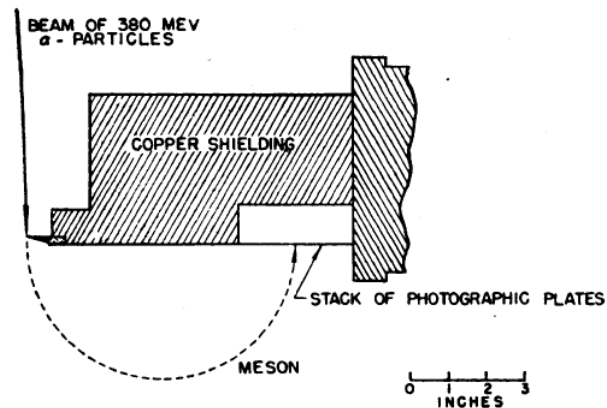


Principio chiave: la maggior lunghezza delle semi-circonferenze viene esattamente compensata dalla maggiore velocità — la frequenza di rivoluzione è indipendente dall'energia

Nel 1948 a Berkeley, il ciclotrone da 4.7 m accelera particelle alfa fino a 380 MeV. Utilizzando bersagli di carbonio e berillio, **vengono prodotti i primi mesoni artificiali**, confermando le osservazioni sui raggi cosmici



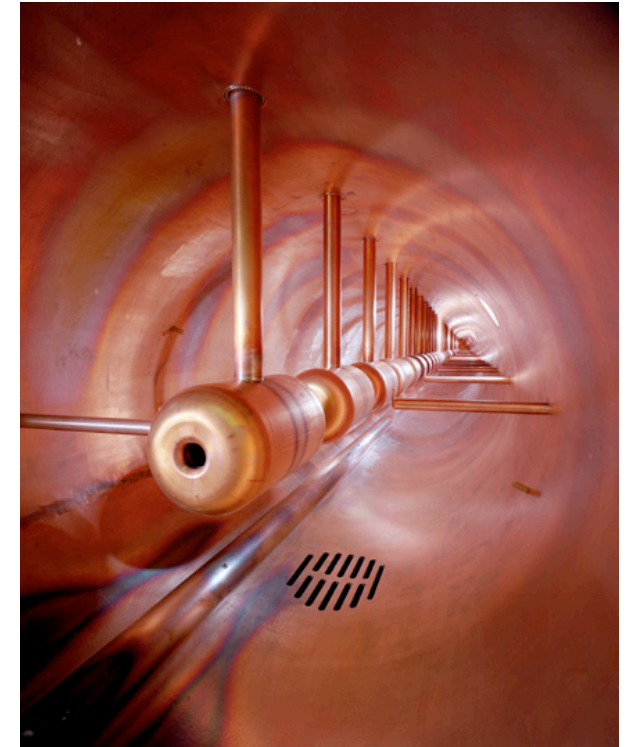
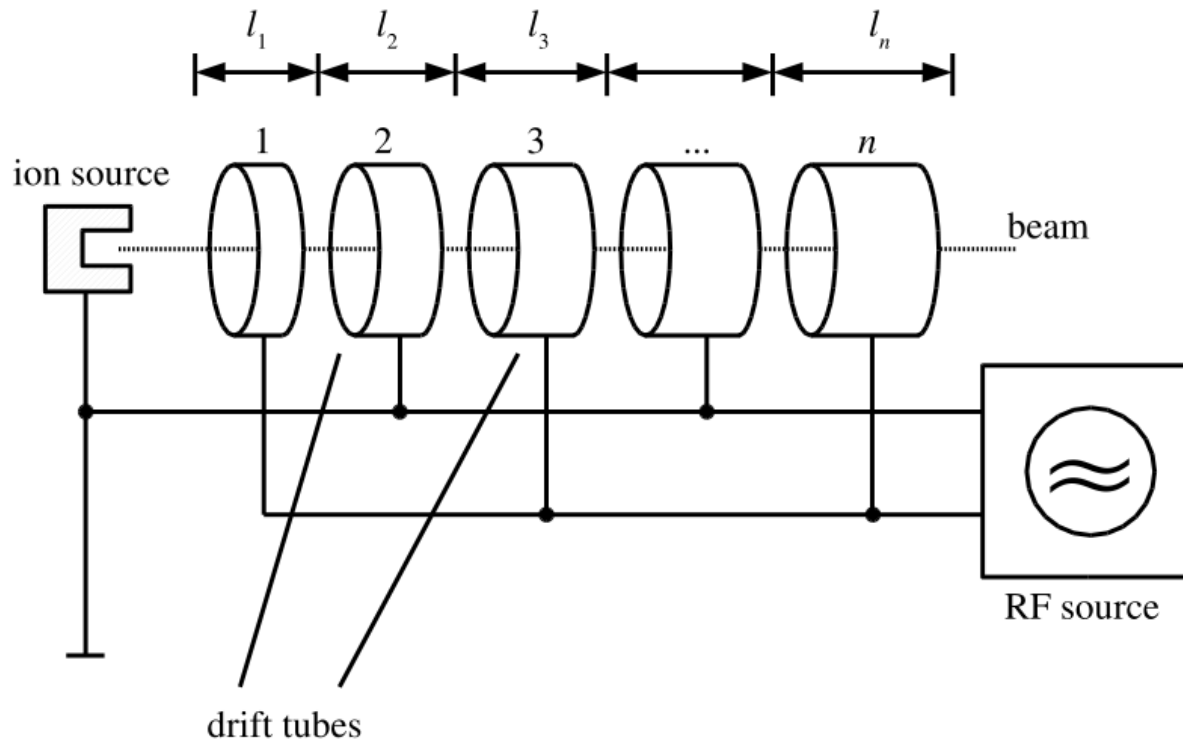
Lattes e Gardner



Accelerazione multipla: l'acceleratore lineare (“linac”)

Concetto introdotto da Ising (1924) e Widerøe (1928)

Accelerazioni multiple generate da campi elettrici alternati tra cilindri conduttori (“tubi di scorrimento”). Quando il campo è fuori fase, le particelle sono schermate.



Linac da 400 MeV a Fermilab

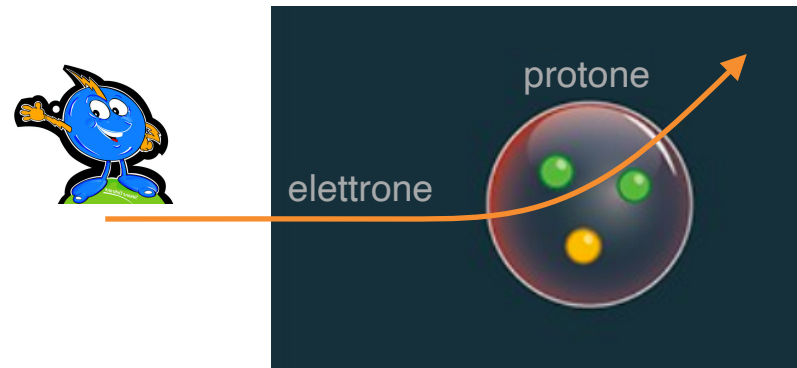
Prima macchina costruita nel 1931 da Sloan e Lawrence per ioni pesanti

Lunghezza dei tubi e frequenza del campo aumentano con la velocità delle particelle

Energia massima determinata dalla lunghezza totale della struttura

L'acceleratore lineare di Stanford (3 km) permise lo studio della **struttura dei nucleoni**.

- 1956, elettroni a **188 MeV**: misura delle **dimensioni del protone**, ~ 0.7 fm
- 1969, elettroni a **17 GeV**: scoperta di “**quark**” all'interno del protone

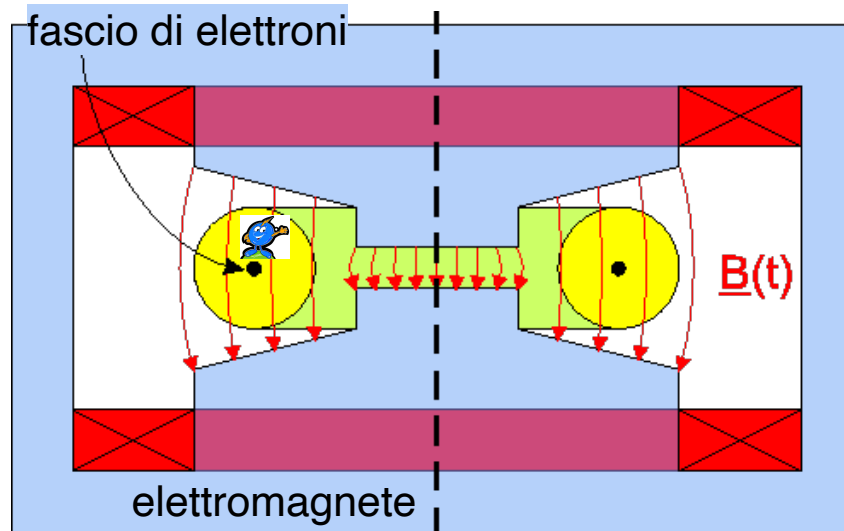
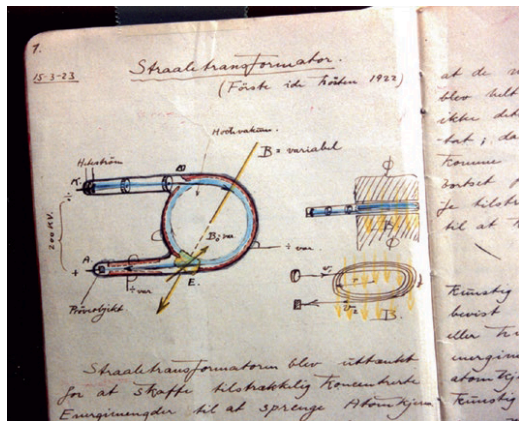


Acceleratore ad induzione: il betatrone

Si basa sul fenomeno dell'induzione elettromagnetica di Faraday

Il **campo magnetico** svolge tutte le funzioni principali:

- **confina** le particelle, con la sua componente verticale
- **focalizza**, tramite la curvatura delle linee di campo ai bordi (focalizzazione debole)
- **accelera**, attraverso il campo elettrico indotto dal campo magnetico variabile



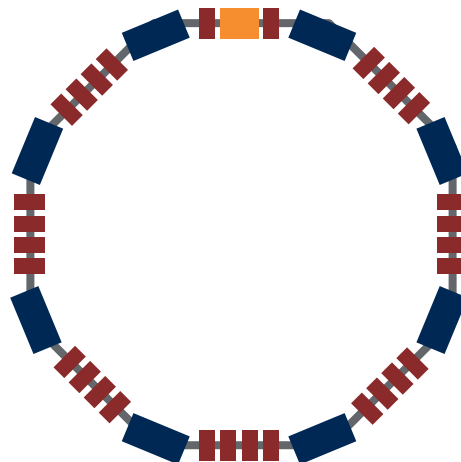
Primo betatrone: 2.3 MeV, 1941

Concepito da Widerøe (1923), sviluppato e costruito da Kerst (1940)

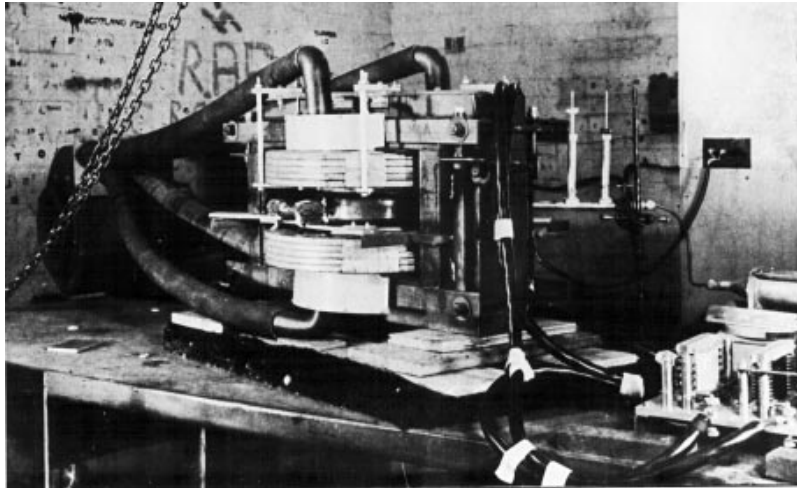
Utilizzato raramente, ma importante per lo sviluppo della teoria delle orbite e della focalizzazione (Kerst e Serber, 1941)

Stabilità di fase e sincrotroni: nascono i moderni acceleratori

- Per ciclotroni e betatroni
(costo) \propto (volume elettromagnete) \propto (raggio)³ \propto (energia)³ !
Una tendenza proibitiva...
- Oliphant (1943) sviluppa il concetto di sincrotrone. Veksler e McMillan (1945) scoprono indipendentemente la **stabilità di fase**. Incrementando insieme frequenza di accelerazione e campo magnetico, le particelle “seguono” i campi e possono rimanere su un’orbita costante al crescere dell’energia.
- La parte centrale dell’elettromagnete è superflua. La macchina assume la forma di **anello**.

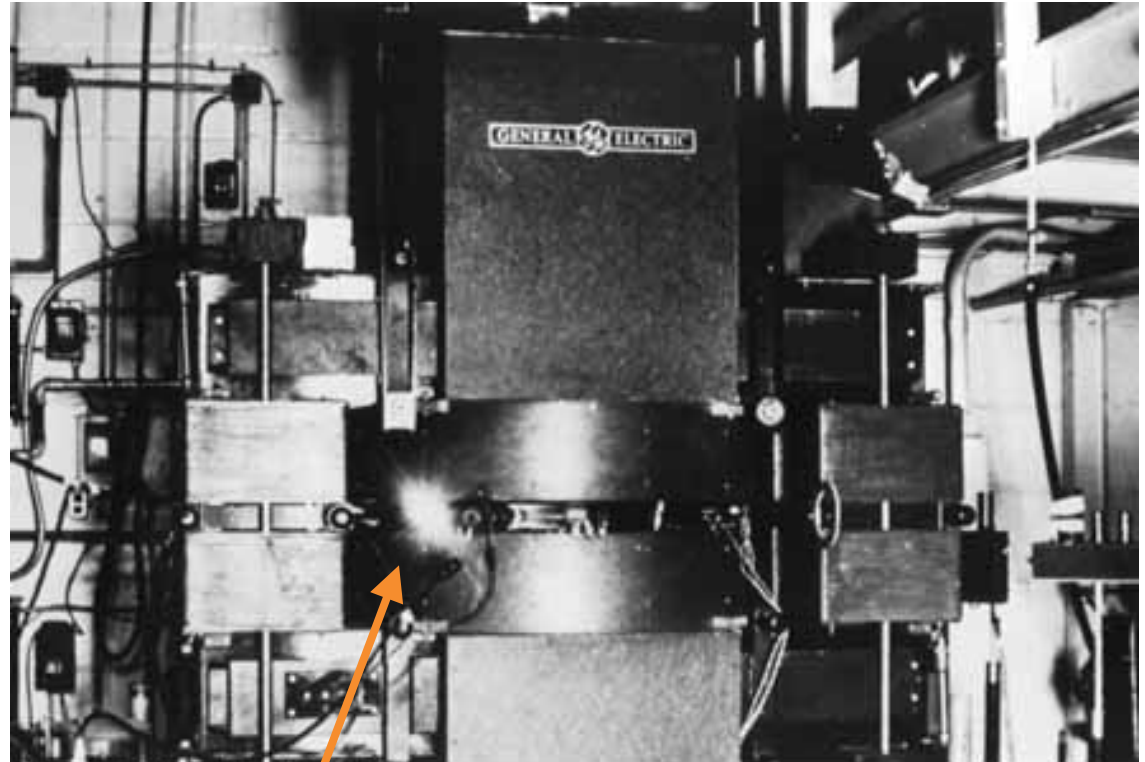


I primi sincrotroni



Primo sincrotrone: F. Goward, UK (1946)
(betatrone modificato)

Sincrotrone da 300 MeV della General Electric (1946)



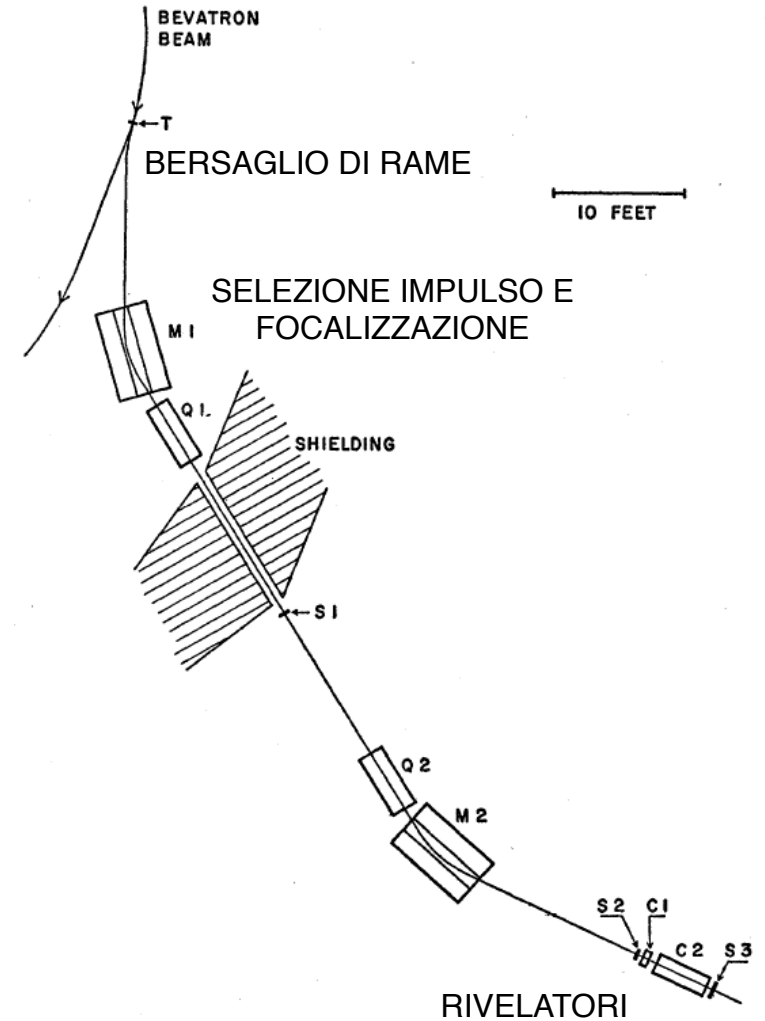
**Prima osservazione diretta della “luce di sincrotrone”
emessa da elettroni in moto circolare**



Il Bevatron a Berkeley genera protoni fino a 6 GeV, energia sufficiente a produrre e scoprire gli antiprotoni (1955)



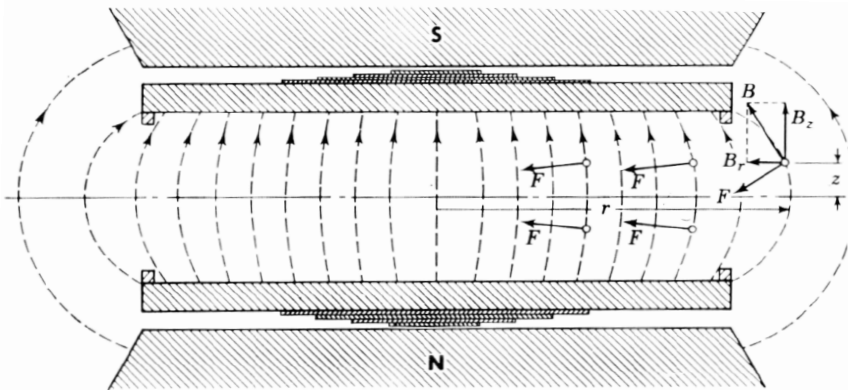
FASCIO DI PROTONI



Gradiente alternato e focalizzazione forte

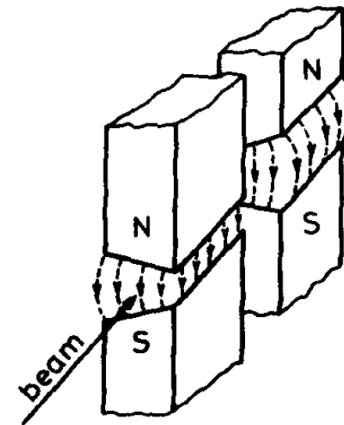
In analogia con l'ottica, Christofilos (1950) e Courant, Livingston e Snyder (1952) scoprono che si ottiene una focalizzazione più compatta ed efficiente **aumentando il gradiente** del campo magnetico **e alternandone il segno** (lenti focalizzanti e defocalizzanti)

focalizzazione debole
(ciclotroni, betatroni, primi sincrotroni)



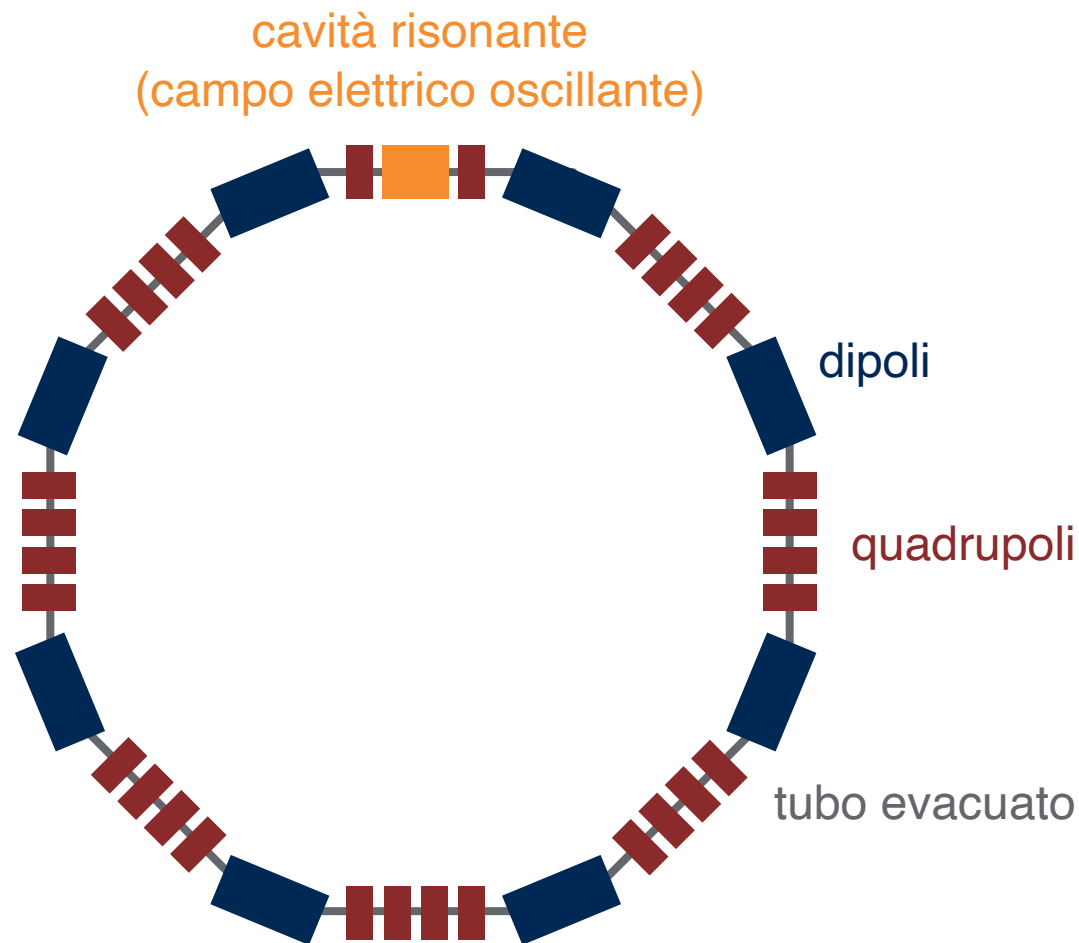
grandi escursioni di orbita e necessità di avere grandi camere evacuate e magneti voluminosi

focalizzazione forte e gradiente alternato



fasci, magneti e camere da vuoto molto più compatti

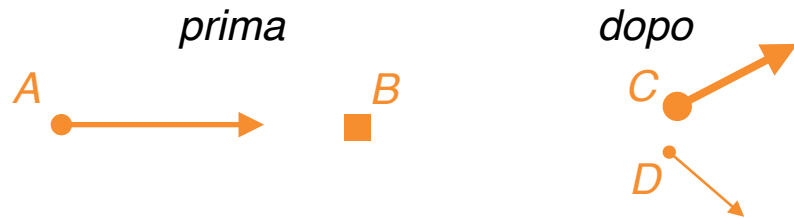
Modello semplificato di sincrotrone moderno



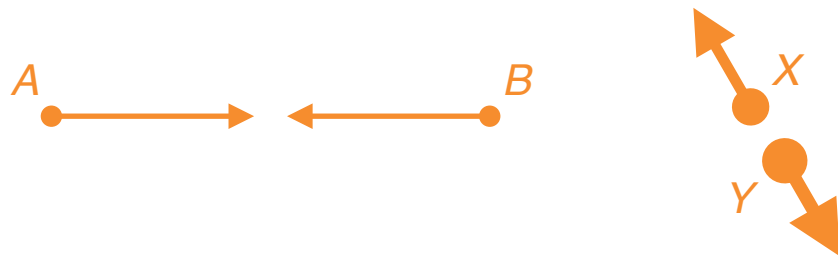
Separazione tra le funzioni di deflessione (magneti dipolari) e focalizzazione (magneti quadrupolari)

Anelli di collisione a fasci incrociati

- Negli **esperimenti a bersaglio fisso**, gran parte dell'energia viene “sprecata” sotto forma di energia cinetica dei prodotti (conservazione dell'energia e dell'impulso)
- L'energia disponibile per creare nuove particelle (*energia nel centro di massa*) è proporzionale alla radice dell'energia dei proiettili: $E_{\text{cm}} = \sqrt{m_A^2 + m_B^2 + 2E_A m_B}$



- In **collisioni frontali** ($\mathbf{p}_A = -\mathbf{p}_B$), tutta l'energia è disponibile: $E_{\text{cm}} = E_A + E_B$



Ricordare:

$$\Delta N = \epsilon \cdot \sigma \cdot v \cdot n_A \cdot n_B \cdot \Delta V \cdot \Delta t$$

- Limiti degli anelli di collisione
 - densità dei fasci molto minore della densità di bersagli solidi, liquidi o gassosi
 - la densità di carica (fasci non neutri) crea forti repulsioni coulombiane

I primi anelli di collisione

“Idea folle”: **materia e antimateria** (stessa massa, carica opposta) circolanti nello stesso tubo per studiare i prodotti di annichilazione (Widerøe, Touschek)



AdA (Anello di Accumulazione)

Prime collisioni elettrone-positrone

250 MeV, 1.3 m di diametro

Frascati (1961) e Orsay (1964)

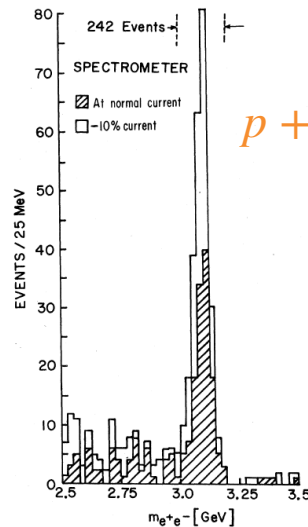
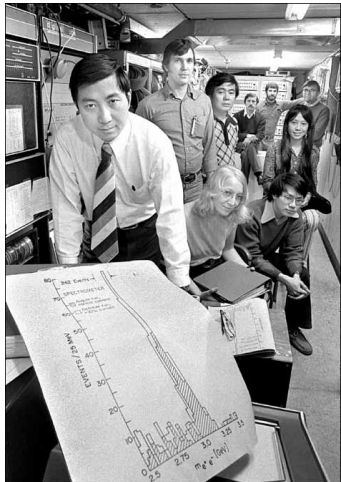
Approcci alternativi con collisioni elettrone-elettrone:

- macchina di Stanford-Princeton
- VEP1 a Novosibirsk

La scoperta del quark “charm” e del “charmonio”: la J/ψ

Nel novembre 1974, due gruppi annunciano simultaneamente l'osservazione di un'**inattesa risonanza a 3.1 GeV**, ossia un numero di eventi molto più grande del previsto

Alternating Gradient Synchrotron a Brookhaven
protoni su bersaglio fisso

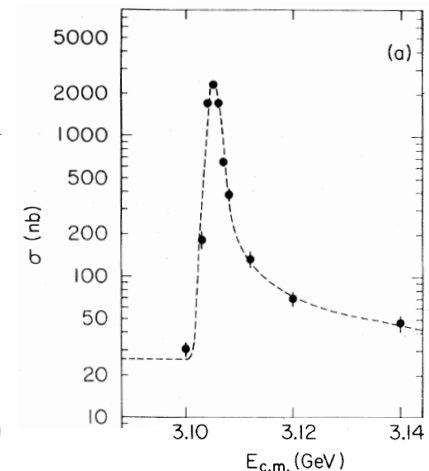


$$p + \text{Be} \rightarrow e^+e^- + X$$

$$e^+e^- \rightarrow \text{adroni}$$

Confermata dopo poche ore (!)
in ADONE a Frascati

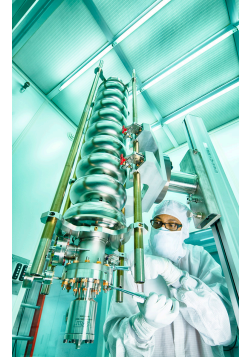
SPEAR a Stanford
collisioni elettrone-positrone



- Esistono quark che pesano più dei protoni!
- Il charmonio, **stato legato di due quark pesanti** ($c\bar{c}$), permise di studiare le forze nucleari in un sistema semplice (non relativistico)
- Soprannominato l' “**atomo di idrogeno delle interazioni forti**”, in analogia con il ruolo dell'atomo di idrogeno in meccanica quantistica

Cenni sugli sviluppi recenti

- Innumerevoli **scoperte** sono state rese possibili dalle macchine acceleratrici
- L'avvento della **superconduttività applicata a magneti e cavità risonanti** ha aperto orizzonti prima impensabili

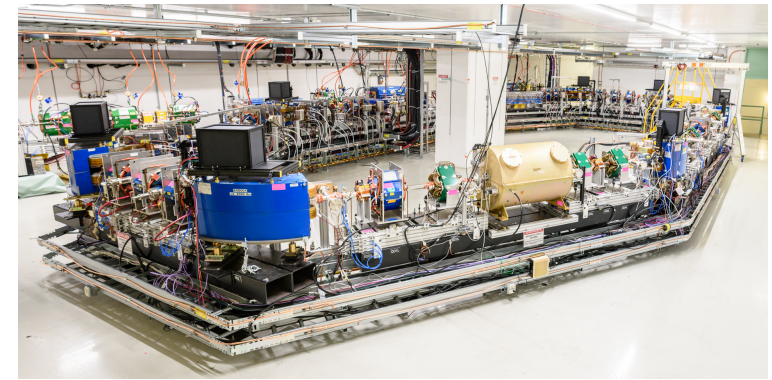
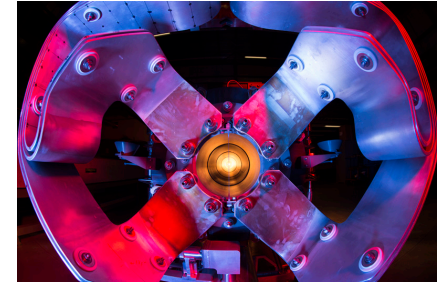


- Gli anelli di collisione (Tevatron a Fermilab, LEP e LHC al CERN, etc.) sono tra gli **strumenti scientifici più potenti e complessi** mai costruiti



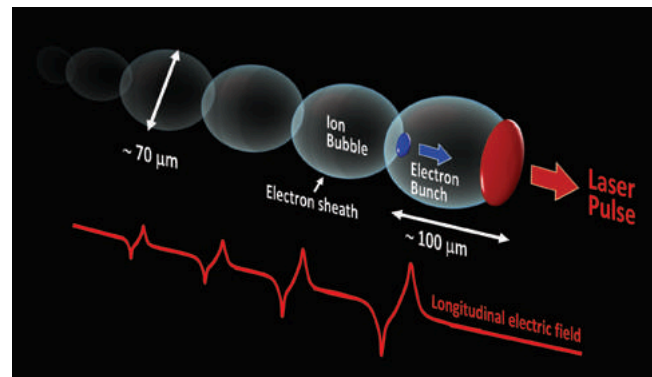
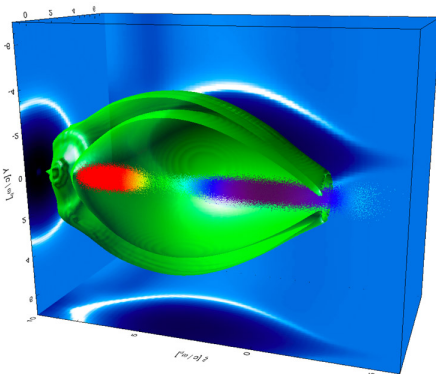
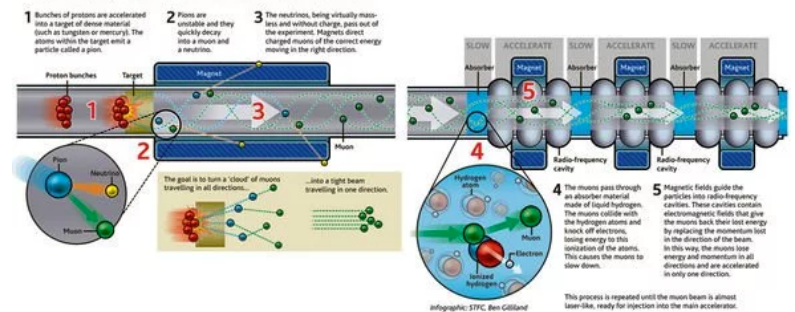
Quali saranno le prossime tappe fondamentali?

- Ricerche attive in diversi campi:
 - produzione e stabilizzazione di **fasci ultra-intensi** per la fisica dei neutrini e dei processi rari
 - nuove tecniche di **raffreddamento** per aumentare la densità dei fasci negli anelli di collisione
 - **accelerazione nei plasmi** eccitati da fasci primari o laser
 - ...



MICE Muon Ionization Cooling Experiment

MICE has made the first ever demonstration of the ionization cooling of muons – a major step in the journey to create the world's most powerful particle accelerator.



Applicazioni degli acceleratori

A cosa servono gli acceleratori?

- **Fisica nucleare e fisica delle particelle elementari**
 - creazione di nuove forme di materia, studio delle forze fondamentali
- **Biologia, chimica, scienza dei materiali**
 - struttura e dinamica di sistemi microscopici con radiazione di sincrotrone, FEL (“free-electron lasers”), sorgenti di neutroni...
- **Medicina**
 - radioterapia, adroterapia, produzione di isotopi per la diagnostica, sterilizzazione,...
- **Archeologia e arte**
 - datazione con ^{14}C , analisi sensibili di piccoli campioni, ...

A cosa servono gli acceleratori?

- **Processi industriali**

- impiantazione ionica nei semiconduttori, micro-litografia, sterilizzazione dei cibi, polimerizzazione, trattamento materiali, ...

- **Difesa**

- rivelazione di carichi illeciti, neutralizzazione pacchi sospetti, ...

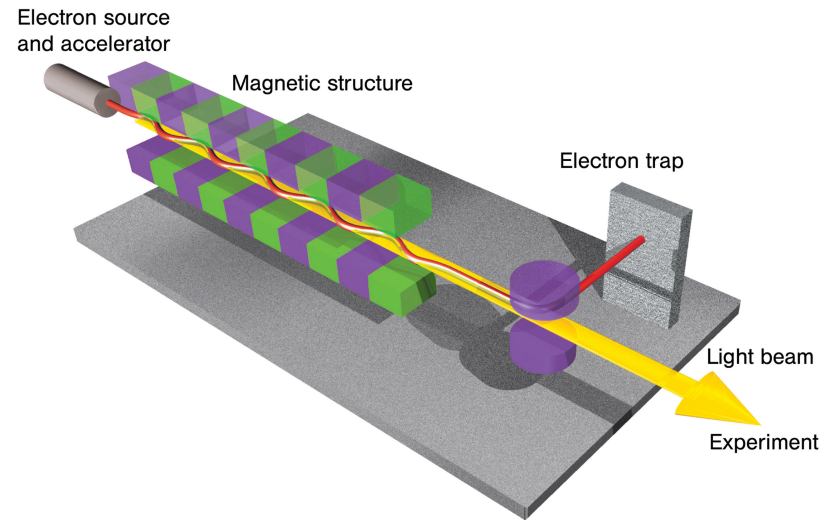
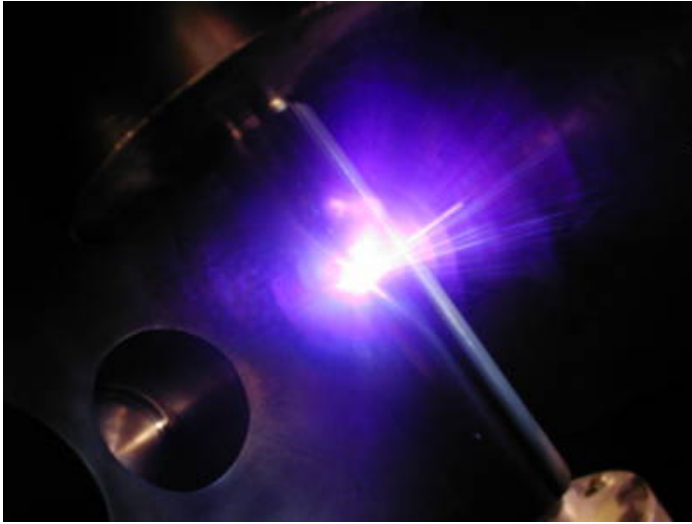
- **Energia e ambiente**

- attivazione reattori nucleari a fissione (ADS), fusione nucleare, trattamento di rifiuti e scorie radioattive, ...

La maggior parte delle **decine di migliaia di acceleratori esistenti** è utilizzata nell'**industria** e in **medicina**.

Sorgenti di luce di sincrotrone

Particelle cariche accelerate emettono radiazione elettromagnetica



Spesso chiamata “luce di sincrotrone” dopo le prime osservazioni con fasci di elettroni in sincrotrone

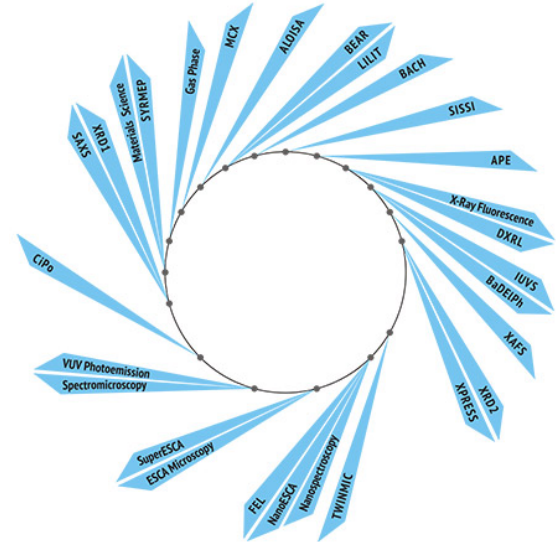
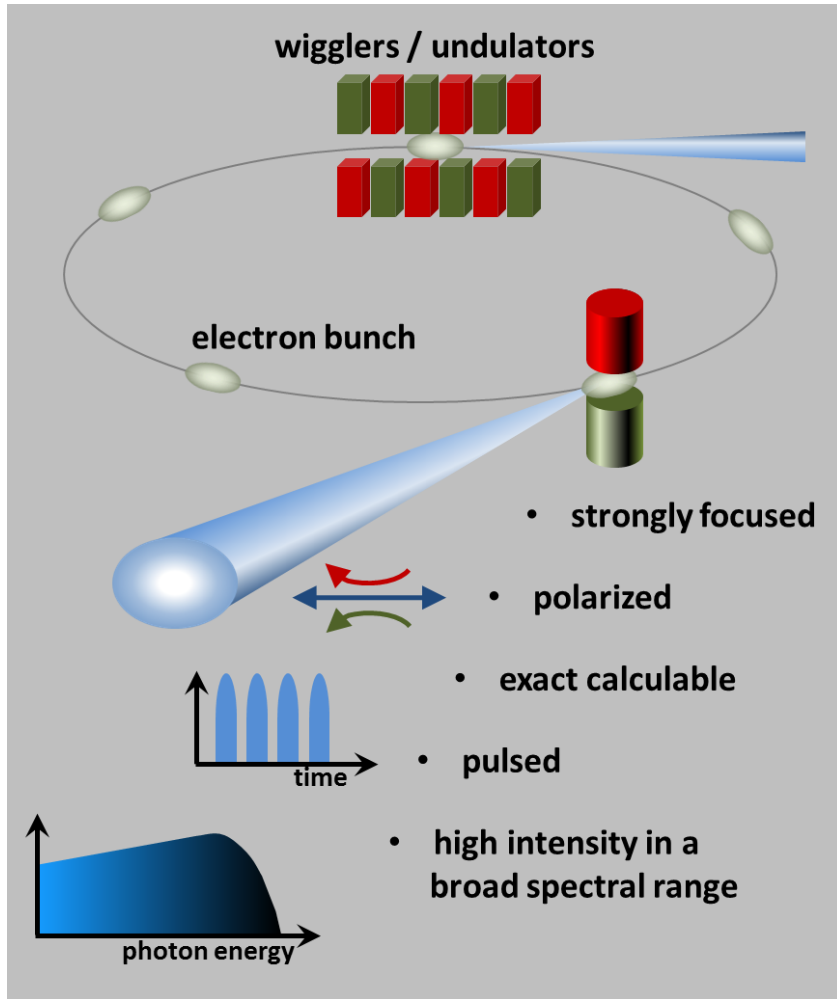


Negli acceleratori:

- l'energia persa deve essere ripristinata dalle cavità acceleranti (svantaggio)
- l'effetto combinato di emissione di radiazione e forze esterne crea un addensamento delle particelle o “raffreddamento” (vantaggio)

Sorgenti di luce di sincrotrone

Sincrotroni per elettroni e FEL generano radiazione con proprietà uniche

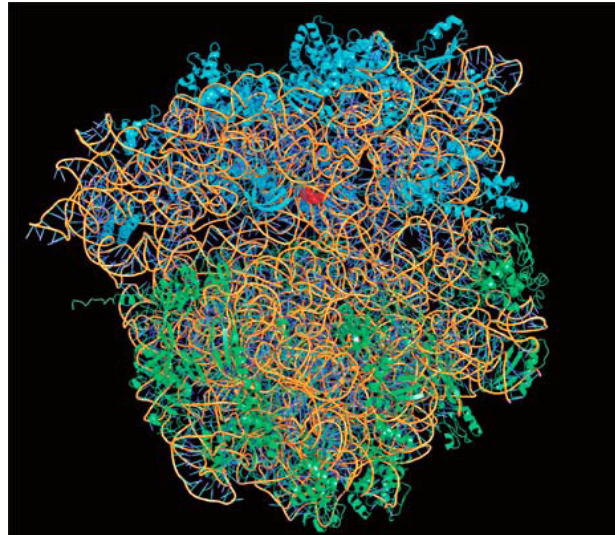
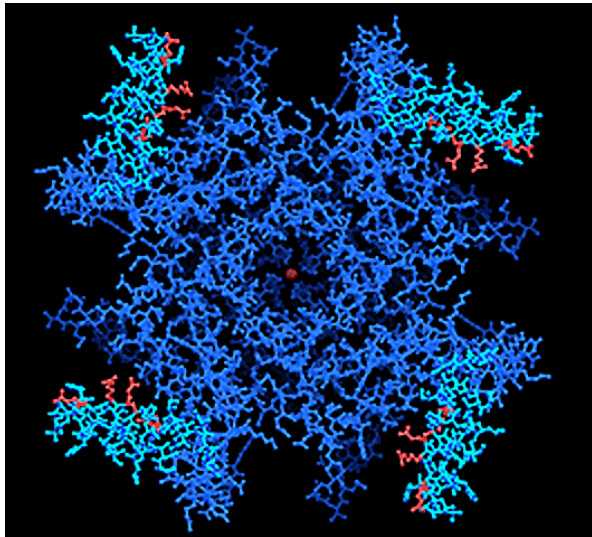


Elettra (sincrotrone) e FERMI (laser a elettroni liberi) a Trieste

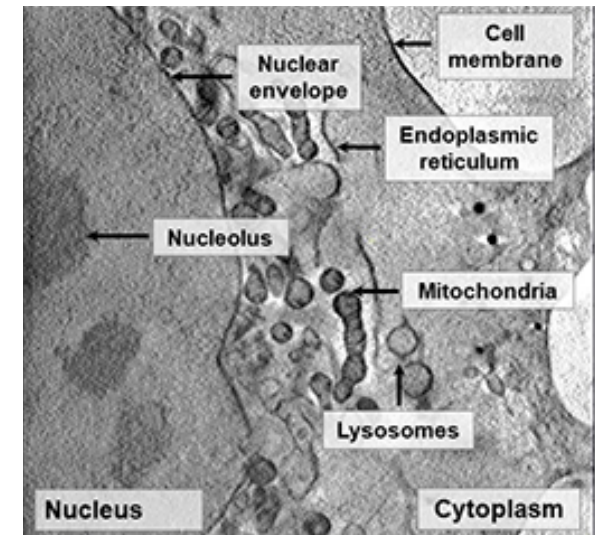
Numerosissime applicazioni della luce di sincrotrone

Decine di laboratori nel mondo sono dedicati alla biologia, medicina, chimica, fisica e scienza dei materiali

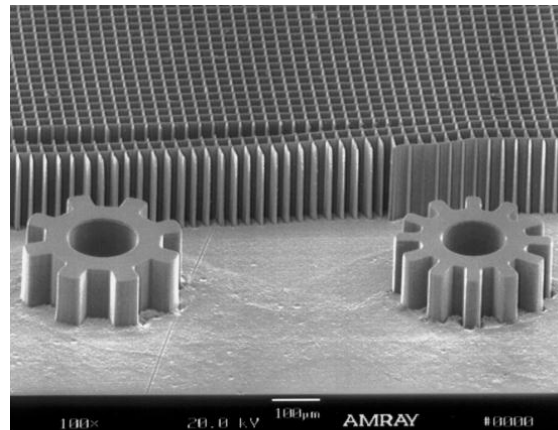
*struttura di macromolecole
(diversi premi Nobel)*



tomografia



lightsources.org



litografia

Acceleratori per la terapia dei tumori

- Le **radiazioni ionizzanti** sono fotoni, elettroni, protoni, ioni, neutroni, ecc. con sufficiente energia per liberare elettroni dalle molecole
- La quantità totale di energia depositata è detta **dose**
- La terapia dei tumori si basa sull'**effetto delle radiazioni ionizzanti sul DNA**
- Spesso le cellule cancerose sono più vulnerabili di quelle sane: **finestra terapeutica**

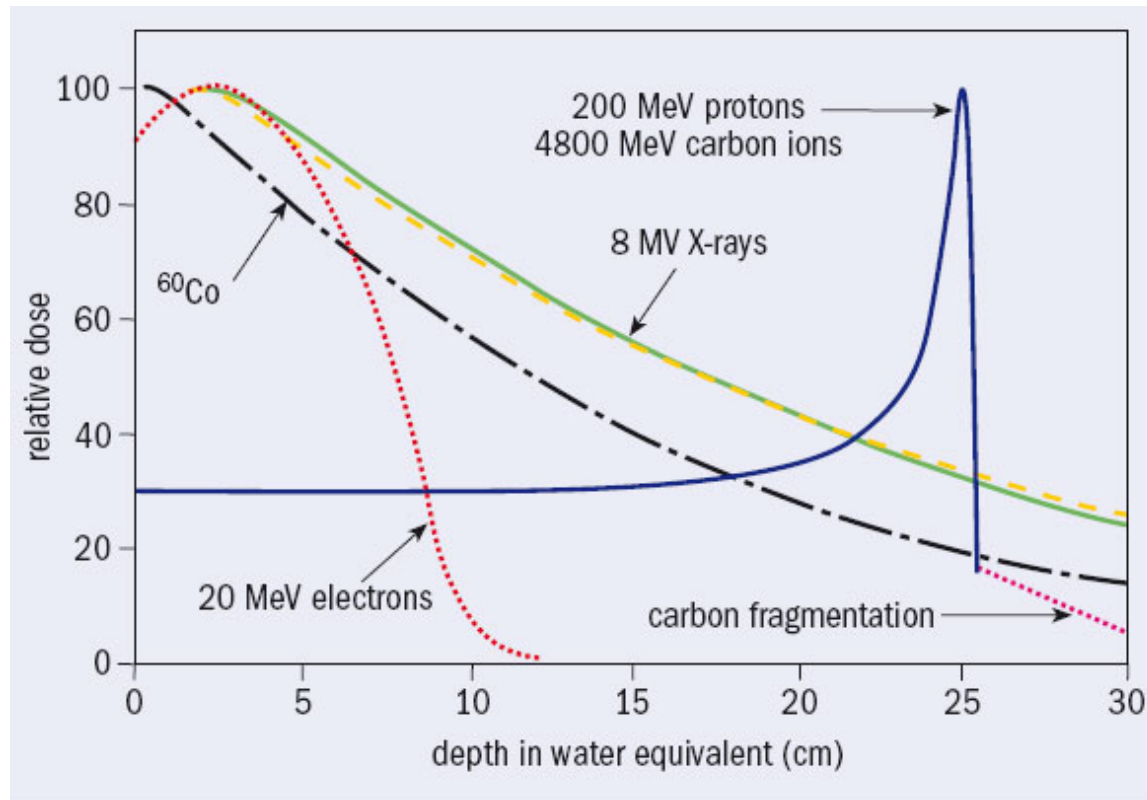


Energia depositata nei tessuti: radioterapia e adroterapia

Ciascun tipo di radiazione ha un suo caratteristico effetto sui tessuti

Elettroni e raggi X
(radioterapia)
depositano energia
su un ampio volume

Protoni e ioni (adroterapia)
rilasciano gran parte dell'energia al
termine del percorso (picco di Bragg)



L'energia del fascio primario determina la profondità di penetrazione. Ad esempio, sono necessari protoni da 200 MeV per raggiungere profondità di 25 cm

Acceleratori per radioterapia e adroterapia



Sistema radioterapico prodotto dalla Varian

Elettroni e raggi X vengono prodotti con **linac** compatti

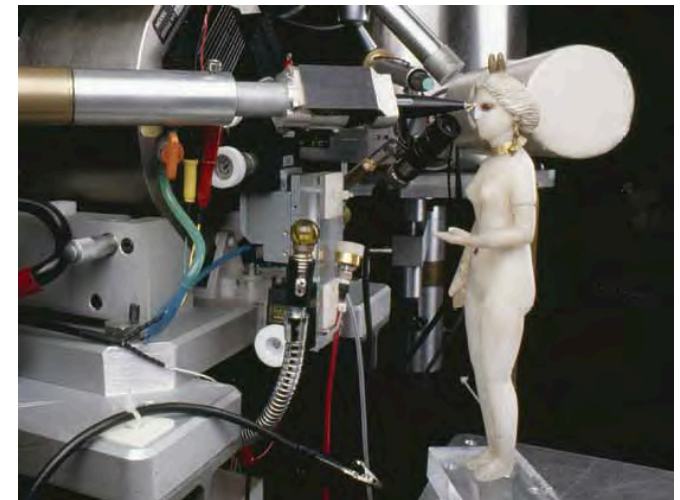
Protoni e ioni carbonio richiedono **sincrotroni** per raggiungere le prestazioni necessarie



Il sincrotrone del CNAO di Pavia

Un acceleratore al Louvre dedicato alle belle arti

AGLAE (Accélérateur Grand Louvre d'Analyse Élémentaire)



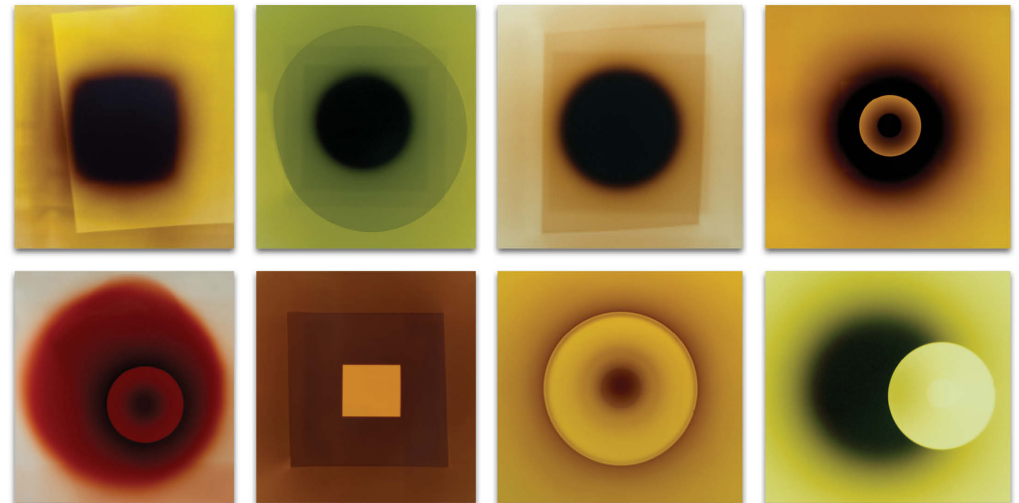
Analisi dei materiali con fascio di ioni (spettri dei raggi X, gamma e dei protoni diffusi) per determinare **età**, **tecniche** utilizzate e **provenienza** delle opere custodite in varie istituzioni culturali

Acceleratori di elettroni creano sculture e fotografie

Shockfossils (figure di Lichtenberg) di Todd Johnson (Fermilab), “fulmini congelati” creati con lastre di acrilico caricate elettricamente da un acceleratore industriale e sottoposte a scarica elettrica improvvisa



Il fotografo Adam Nadel usa elettroni dalla macchina A2D2 a Fermilab (invece della luce) per creare immagini astratte su pellicola fotografica



“Every science begins as philosophy and ends as art.” -Will Durant

Spunti per la didattica

Idee per progetti didattici

- **Approfondire una scoperta** resa possibile dagli acceleratori di particelle: Qual è la rilevanza per la storia della scienza? Com'è stato progettato l'esperimento? Quali strumenti sono stati utilizzati? Quali conclusioni si possono trarre? Quali domande rimangono ancora aperte?
- **Approfondire un'applicazione** degli acceleratori: Qual è la rilevanza per la società? Quali tecnologie e soluzioni sono state sviluppate? Quali problemi rimangono insoluti?
- **Approfondire l'aspetto storico e umano** degli sviluppi scientifici: Contesto storico, aneddoti, biografie

Idee per progetti didattici

- **Analogia tra ottica geometrica e focalizzazione di particelle cariche:** Quali sono gli aspetti simili? Quali sono le differenze? Come cambiano i concetti principali? Raggi, lenti, lunghezza focale, matrici di trasporto, aberrazioni cromatiche, ...
- **Il ruolo dell'oscillatore armonico** in fisica: meccanica classica, elettromagnetismo, meccanica quantistica, ...
- **Analogia tra il moto di una carica in un condensatore e in un campo gravitazionale.** Cosa cambia nel diodo limitato dalla densità di carica? (“Oscillatore armonico” della fisica dei fasci di particelle.)
- Introduzione ai **sistemi dinamici non lineari** e alla **fisica del caos**. Cosa significa “comprendere” un fenomeno fisico? Che differenza c'è tra conoscere le equazioni e fare previsioni? Come si applica la teoria dei sistemi dinamici a fenomeni reali?

Risorse

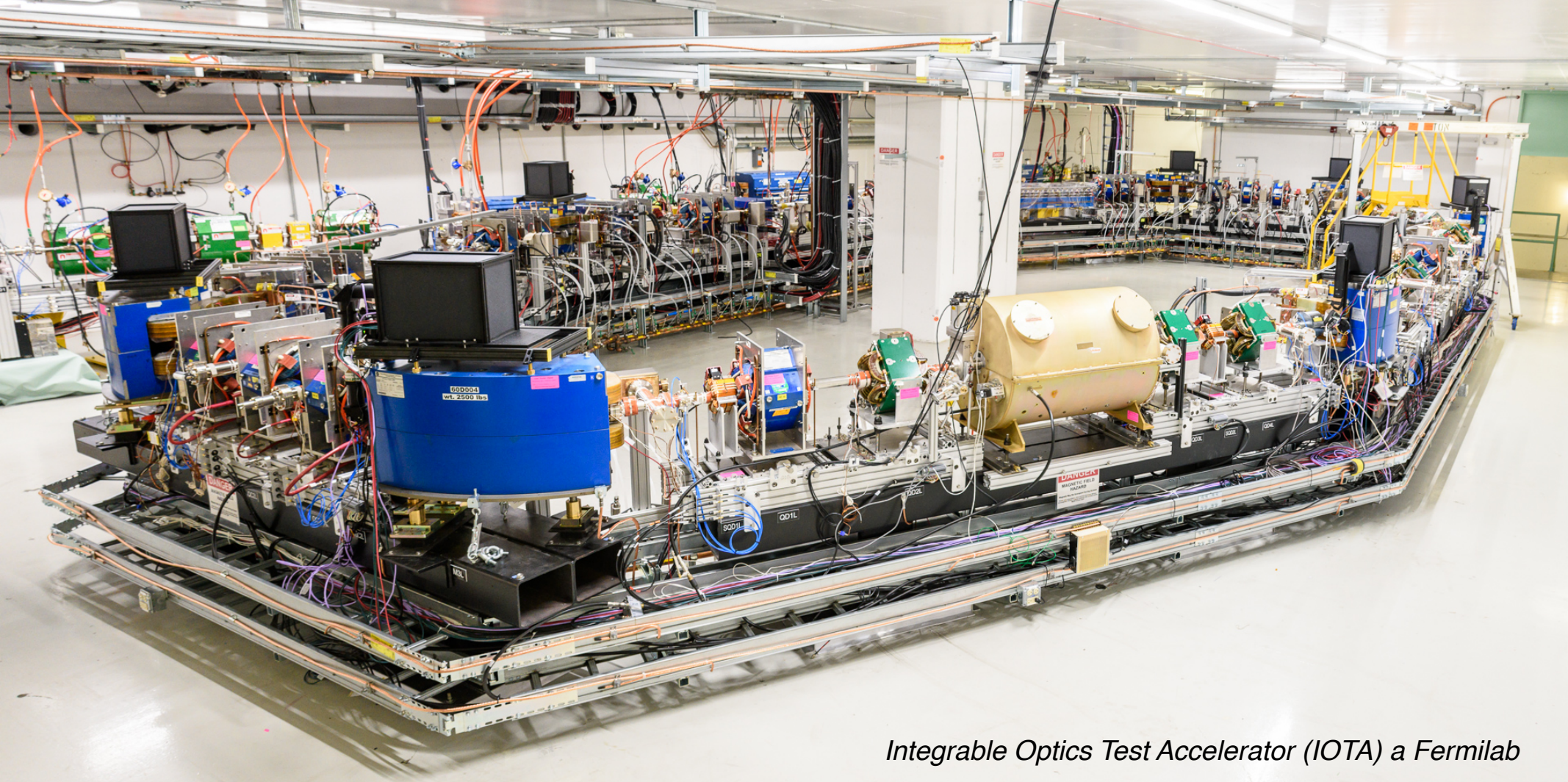
Libri, riviste, siti Internet

- Rivista [Asimmetrie](#) dell'INFN, numero sugli acceleratori (4/2008)
- Sessler e Wilson, Engines of Discovery (World Scientific)
- Segré, Personaggi e scoperte della fisica contemporanea (Mondadori)
- Bernardini, Fisica vissuta (Codice)
- Amaldi, La fisica del caos (Zanichelli)
- Gleick, Caos (Sansoni)
- Segré, Nuclei e particelle (Zanichelli)

- CERN Beamline for Schools, beamlineforschools.cern
- CERN Accelerator School, cas.web.cern.ch
- US Particle Accelerator School, uspas.fnal.gov

Contatti

- Il mio sito Internet a Fermilab
 - home.fnal.gov/~stancari
- Corso introduttivo sugli acceleratori per laureandi e dottorandi, Università di Ferrara (2019)
 - bitbucket.org/gist/apufe19



Integrable Optics Test Accelerator (IOTA) a Fermilab

Grazie per l'attenzione!

