

---

# Gli acceleratori di particelle

## terza parte

---

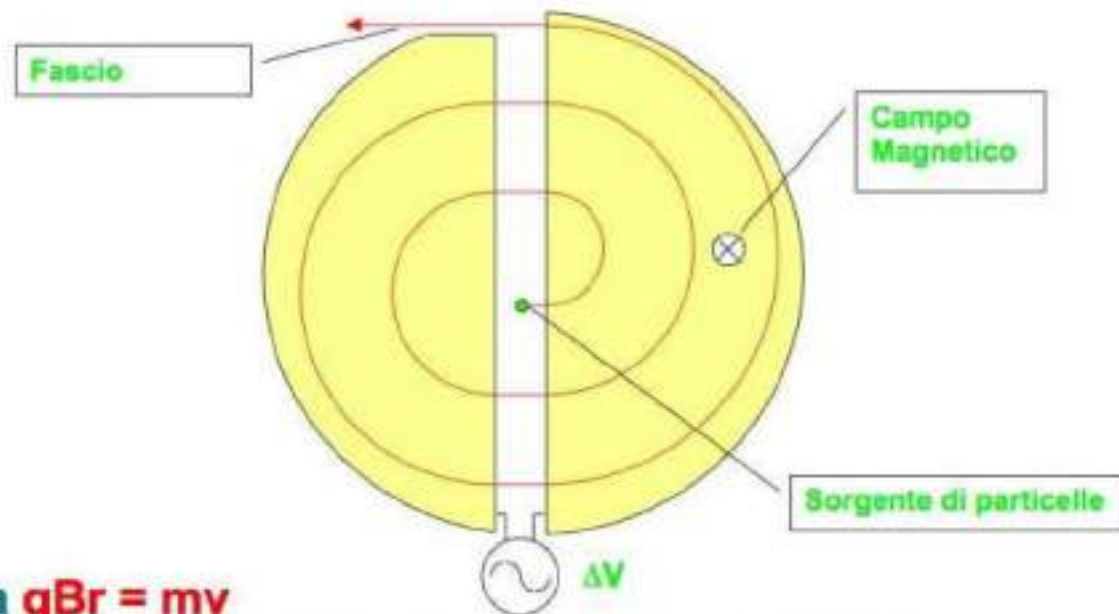
Corso di valorizzazione delle eccellenze in  
Matematica e Fisica  
Liceo Statale Scientifico, Linguistico e Classico  
“Giolitti-Gandino”

# Acceleratori circolari

Poi però furono concepiti acceleratori in cui le particelle cariche ripassavano per un potenziale elettrico acceleratore grazie ad un campo magnetico che le teneva su un'orbita circolare o (quasi).

**Ciclotrone** (orbite a spirale a frequenza di rotazione indipendente dall'energia; freq. di ciclotrone). Energie raggiunte  $\cong 10 - 15$  Mev, protoni o deutoni, fascio continuo.

**CICLOTRONE (E.O.Lawrence, 1931):**  
 $\Delta V$  oscillante con  $\nu = qB/2\pi m$ , frequenza di ciclotrone

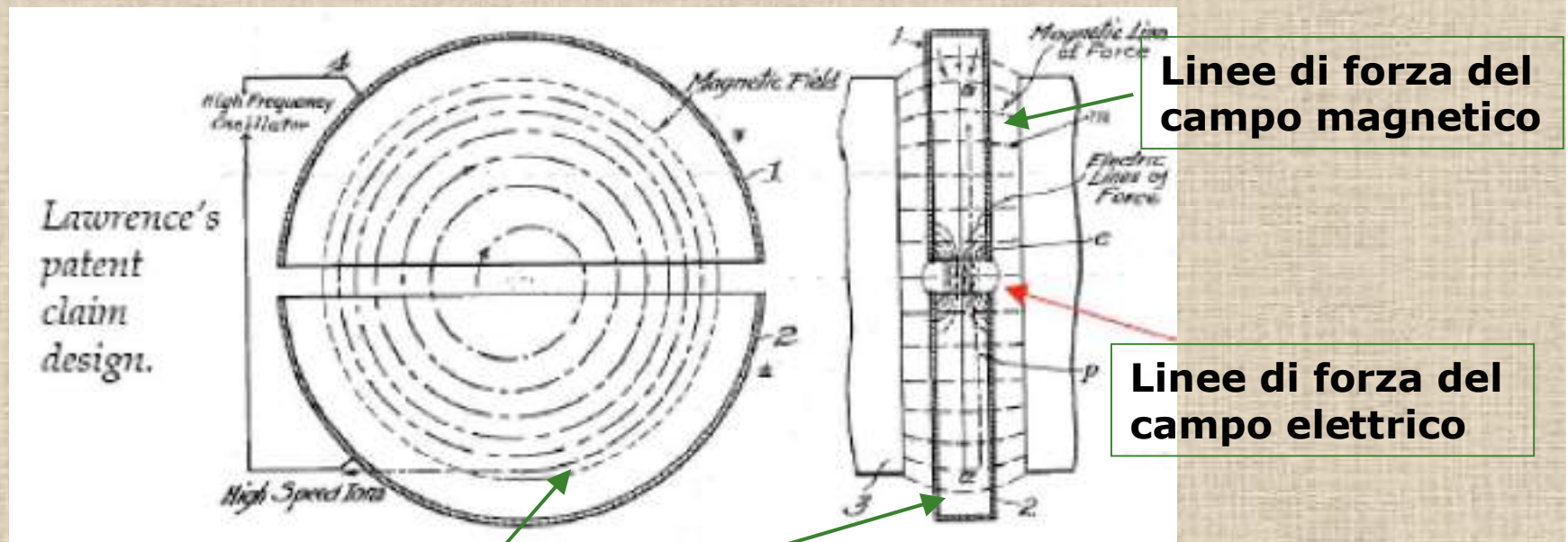


ma  $qBr = mv$

per avere  $v$  grande  $\Rightarrow B$  grande o  $r$  grande

# L'idea del ciclotrone

- E.O. Lawrence nel 1929 leggendo un articolo di Wideroe ha l'idea di usare lo stesso "gap" molte volte facendo curvare la traiettoria delle particelle con un **campo magnetico** (invece di usare molti "gap")



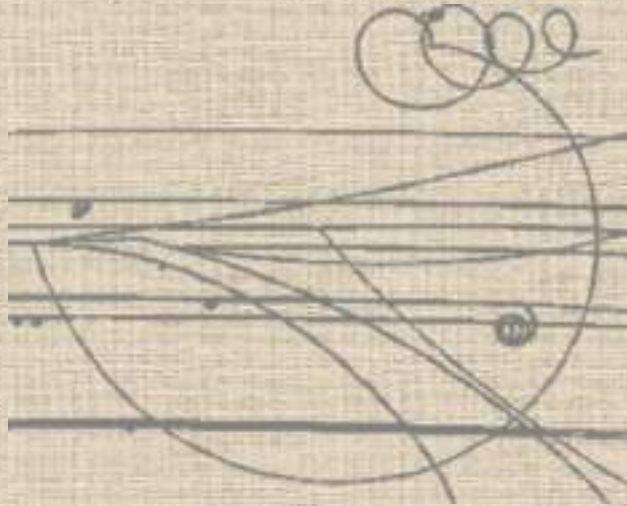
**Linee di forza del campo magnetico**

**Linee di forza del campo elettrico**

**Elettrodo cavo a forma di "D"**

<https://www.youtube.com/watch?v=cNnNM2Zqlsc>

# La forza di Lorentz



Una carica che penetra in un campo magnetico costante è sottoposta alla forza magnetica solo se non viaggia parallelamente alle linee di campo.

In questo caso infatti la forza magnetica è nulla e il moto è rettilineo uniforme.

Se la carica si muove perpendicolarmente alle linee di campo la traiettoria è circolare perché la forza si mantiene sempre perpendicolare alla velocità.

In generale la traiettoria sarà elicoidale (composizione di un moto rettilineo uniforme e di uno circolare).

La forza di Lorentz è sempre perpendicolare alla velocità.

$$\vec{F}_L = q\vec{v} \times \vec{B}$$

$$\vec{F}_L \perp \vec{v} \Rightarrow \text{Lavoro compiuto da } \underline{F_L} \text{ è nullo}$$

$$L = \Delta E_C = 0 \quad \underline{F_L \text{ non fa variare l'en. cinetica}}$$

$F_L$  fa variare la direzione della velocità, ma il modulo della velocità rimane costante

Quando una particella entra in un campo magnetico  $B$ , la

$F_L$  fa curvare la traiettoria della particella.

$$\frac{mv^2}{r} = qvB \quad \text{Forza centripeta fornita dalla } F_L$$

$$r = \frac{mv}{qB} \quad \text{Raggio dell'orbita costante poiché } v \text{ è costante.}$$

Traiettoria: cerchio nel piano perpendicolare a B

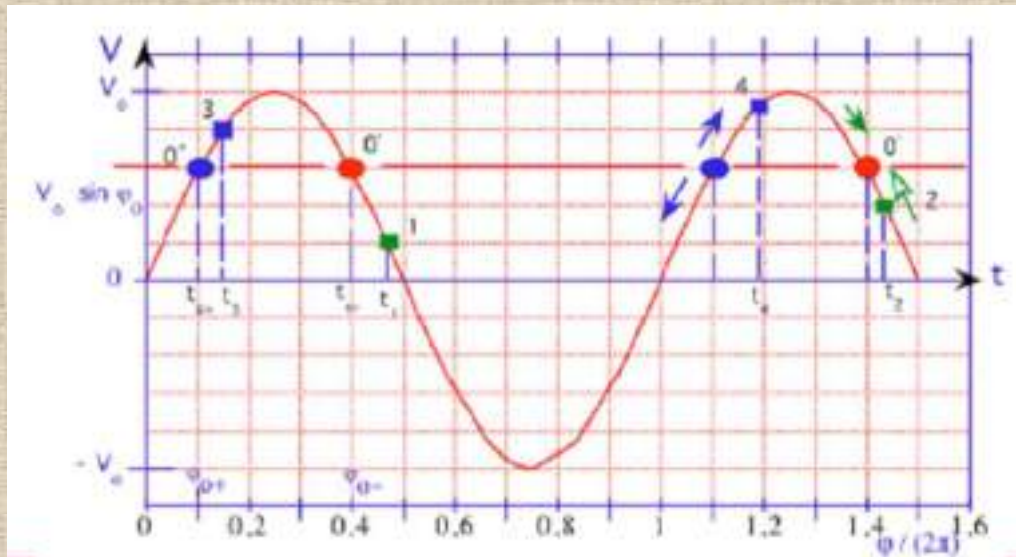
$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi m}{qB} \quad \text{Periodo}$$

$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{qB}{2\pi m} = \frac{\omega}{2\pi} \quad \text{Frequenza, pulsazione}$$

$$\omega = \frac{q}{m} B \quad \text{Frequenza ciclotronica}$$

# La stabilita' di fase

*Problema:* le particelle del fascio non hanno esattamente la stessa energia, quelle di **energia** minore (maggiore) della media tendono a portarsi su un'orbita con **raggio di curvatura** minore (maggiore) e arrivano **sfasate** al giro successivo



La particella ● e' sull'orbita centrale e resta sempre in fase;

La particella ■ e' in ritardo: trova una ddp minore, la sua velocita' angolare aumenta e al giro successivo recupera una parte del ritardo.

## Limitazione principale del ciclotrone: aumento relativistico della massa

La frequenza non può rimanere costante:

$$f = q B / 2\pi m$$

o si aumenta B per raggi grandi

o si modula opportunamente la frequenza per rimanere in fase col passaggio delle particelle con energia (inerzia) maggiore.

Con il sincrociclotrone si fa per l'appunto questo.

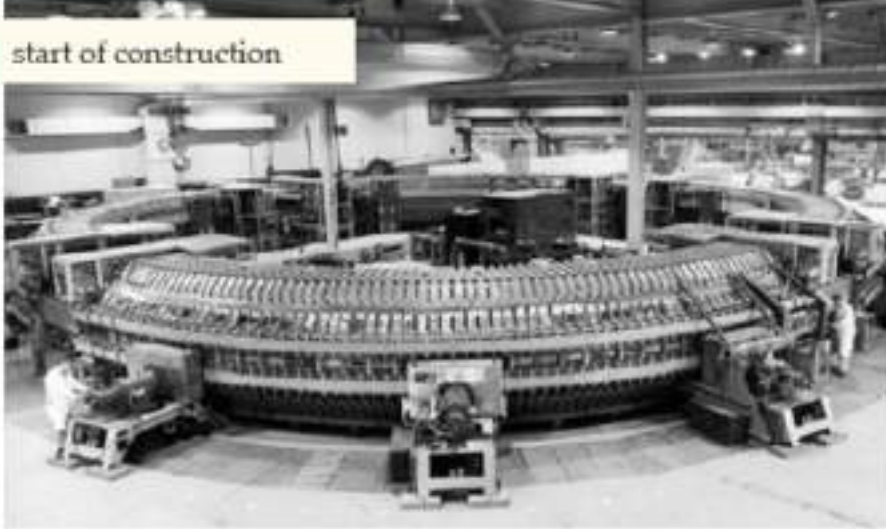
## Sincrociclotrone di Berkeley





# Primi sincrotroni (weak focusing)

1951 start of construction



The BNL 3 GeV p-synchrotron

Sincrotrone a protoni da **3 GeV**  
al Brookhaven National Laboratory  
(Long Island, NY)

Sincrotrone a elettroni  
da **1 GeV** a Frascati

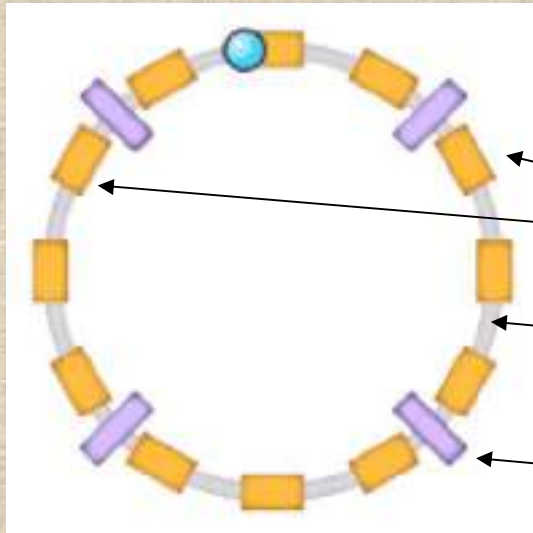
1953 start of design



The 1 GeV Frascati e-synchrotron

# Sincrotrone

La soluzione per le alte energie



Raggio dell' orbita costante

Con magneti dipolari disposti solo lungo l'orbita del fascio.

Protoni o elettroni mantenuti all'interno di un tubo a vuoto.

Accelerazione effettuata solo in alcuni punti dell'anello

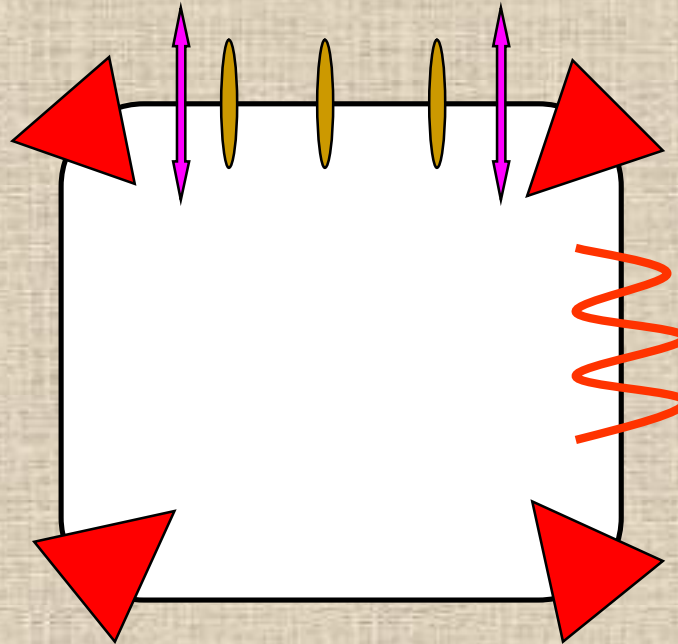
Intensità di  $B$  variabile nei magneti bipolari

Frequenza variabile nelle cavità acceleratrici

# Principio del sincrotrone

- nel sincrotrone ci sono tre funzioni separate:
  - accelerazione** → cavità risonanti a radiofrequenza (campo elettrico)
  - curvatura** → elementi magnetici: **dipoli**
  - focalizzazione** → elementi magnetici: **quadrupoli**
- il raggio  $r$  e' costante, l'orbita e' chiusa (solitamente circolare)
- il campo magnetico  $B$  aumenta durante il ciclo di accelerazione per star dietro all'aumento della quantità di moto  $p$
- Il sincrotrone ha bisogno di un iniettore (per esempio un LINAC) che porti le particelle ad una velocità relativistica

# Principali magneti di un anello

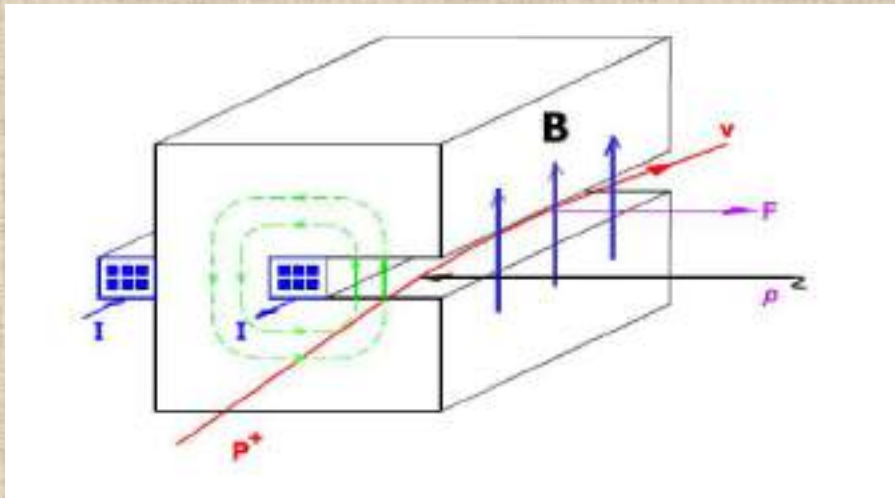


**DIPOLI** – determinano la traiettoria di riferimento

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

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

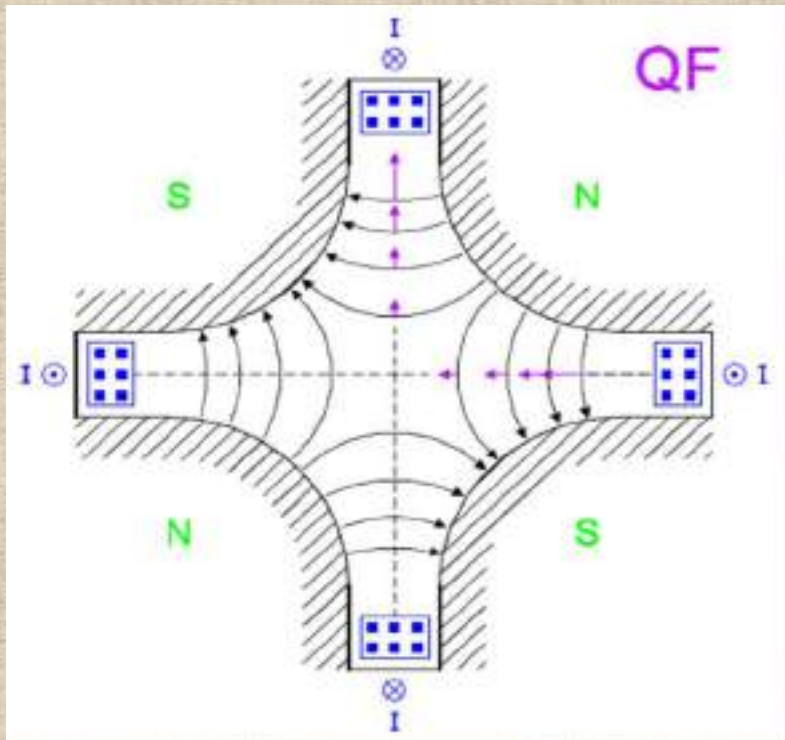
# I dipoli di curvatura



- I**: corrente negli avvolgimenti del magnete
- B**: campo magnetico
- v**: velocità della particella
- F**: forza di Lorentz
- $\rho$** : raggio dell'orbita

I magneti dipolari di curvatura servono a mantenere una traiettoria circolare, per applicare molte volte il campo elettrico delle cavità a radiofrequenza (RF)

# I quadrupoli di focalizzazione

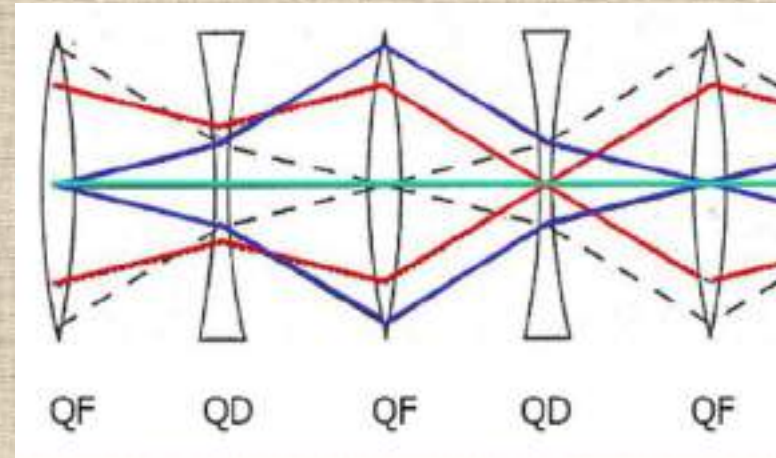
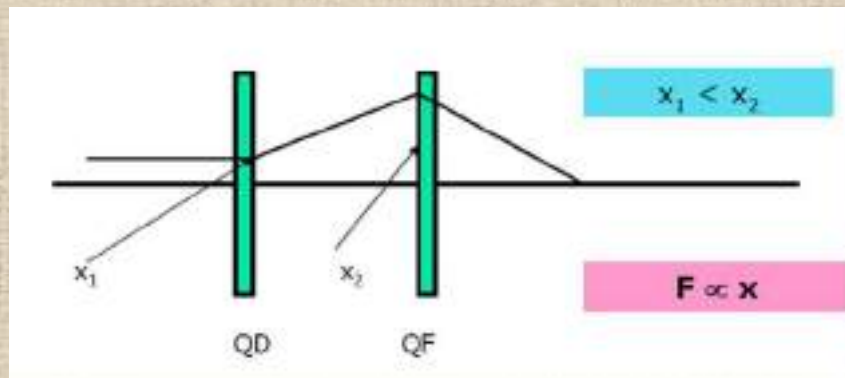


Le componenti x e y della **forza di Lorentz** che agisce su una particella di carica positiva entrante nel piano del disegno sono:

$$F_x = -g x$$
$$F_y = g y$$

La forza aumenta linearmente con lo spostamento dalla traiettoria ideale. L'effetto e' **focalizzante** nel piano orizzontale (H) ma **defocalizzante** in quello verticale (V) ... come fare ?

# Focalizzazione forte



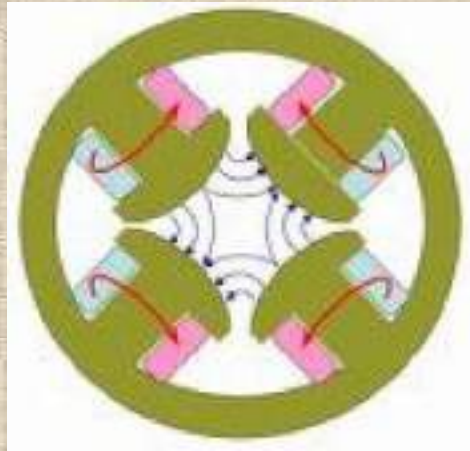
L'effetto di una "lente" magnetica (quadrupolo) defocalizzante seguita da una focalizzante e' complessivamente focalizzante

La focalizzazione forte e' stata inventata da Christofilos e da Courant, Livingston e Snyder (1950-1952)



Magnete dipolare (bending magnet)

Magnete quadrupolare per il  
foccheggiamento





# Grandi Sincrotroni per protoni

Sincrotroni per protoni, PS (anelli magnetici a campo variabile, RF modulata in frequenza) Energie raggiunte 1 TeV e oltre. Fascio pulsato con alto duty-cycle.



# Colliders - La via per le altissime energie

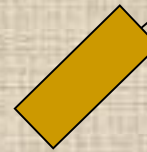


L'energia nel centro di massa è data dalla somma delle due energie dei fasci. Aumenta linearmente con  $E$ , mentre nel bersaglio fisso era proporzionale a  $\sqrt{E}$ .

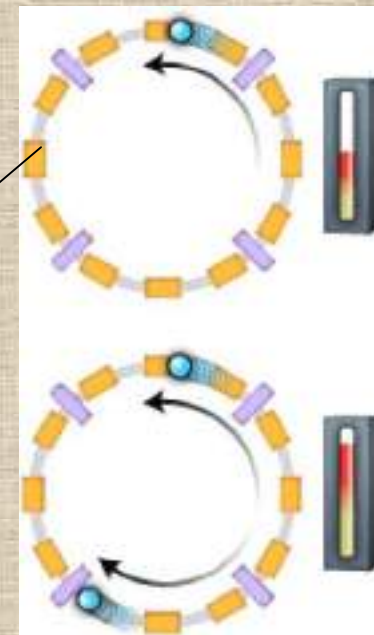
Esistevano già anelli a fasci incrociati per protoni (e antiprotoni), ISR, ma l'energia era bassa, max. 62 GeV, peraltro la più alta mai raggiunta



$$E_{\text{cm}} = \sqrt{2mE}$$



$$E_{\text{cm}} = 2E$$



# L'anello ISR (p-p) al CERN

Primo anello di accumulazione **p-p**  
Progetto iniziato nel 1965  
In funzione nel 1971  
Energia: **31 + 31 GeV**



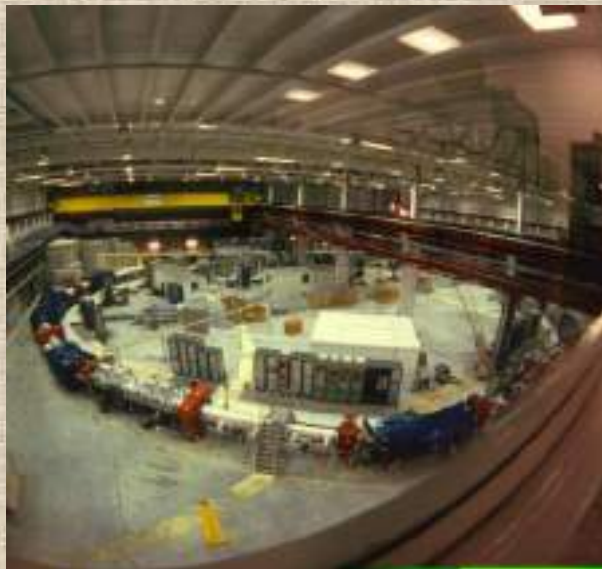
S. Van der Meer invento' per l'ISR il **raffreddamento stocastico** (tecnica per smorzare le fluttuazioni casuali di densita' del fascio) che venne poi utilizzato nel collisionatore protone-antiprotone del CERN (S. Van der Meer ottenne il premio Nobel nel 1984 con C. Rubbia)

**Super Proto Sincrotrone  
del CERN (SPS) E = 450 GeV  
Tunnel di 7 Km**

Alla fine degli anni '70 viene convertito  
in un collider protone – antiprotone con  
 $E_{cm} = 540 - 900 \text{ GeV} !!$



Accumulatore di antiprotoni



Carlo Rubbia

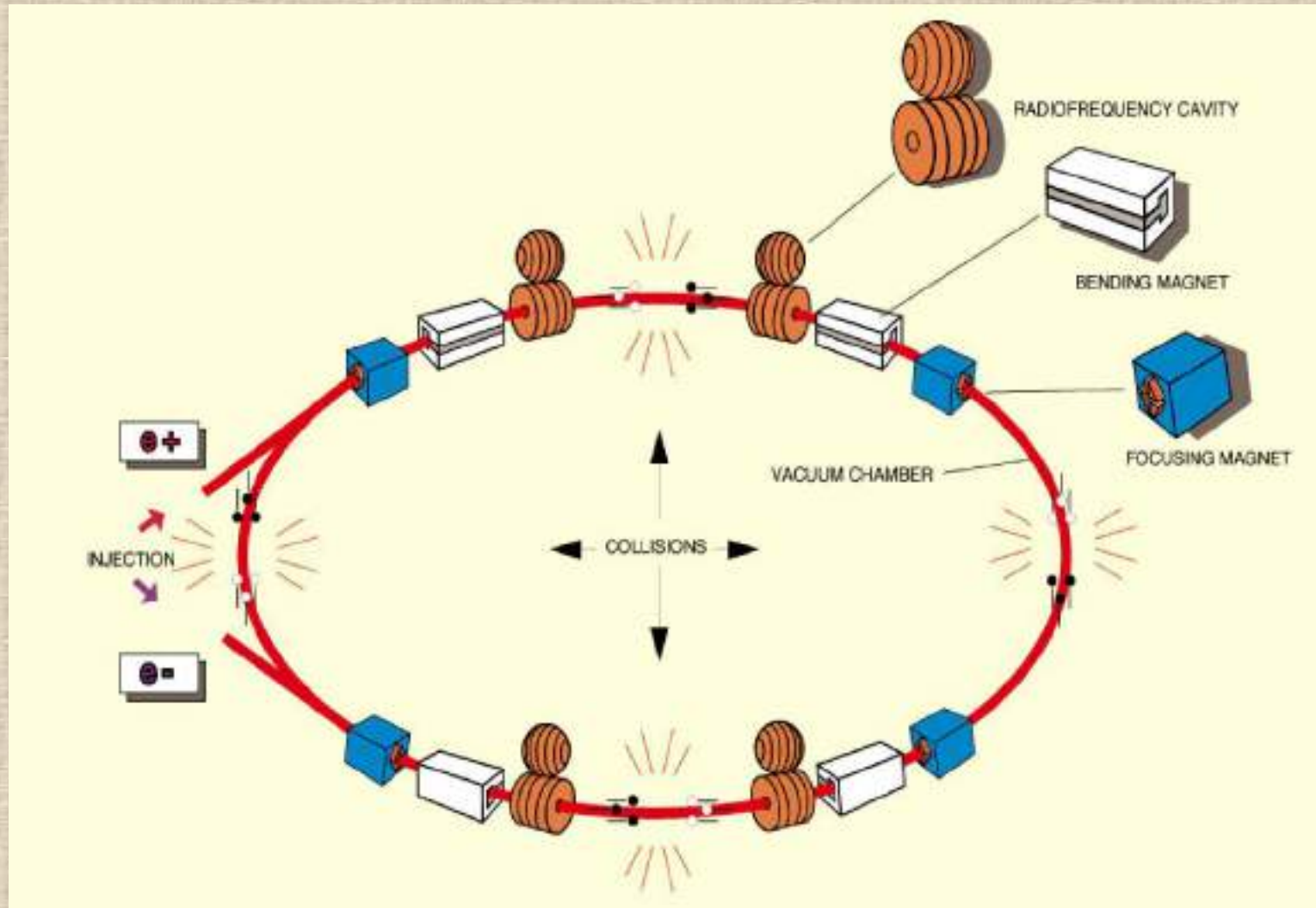
Premio Nobel 1984 per la scoperta  
dei mediatori della forza debole

$W^+ W^- Z^0$

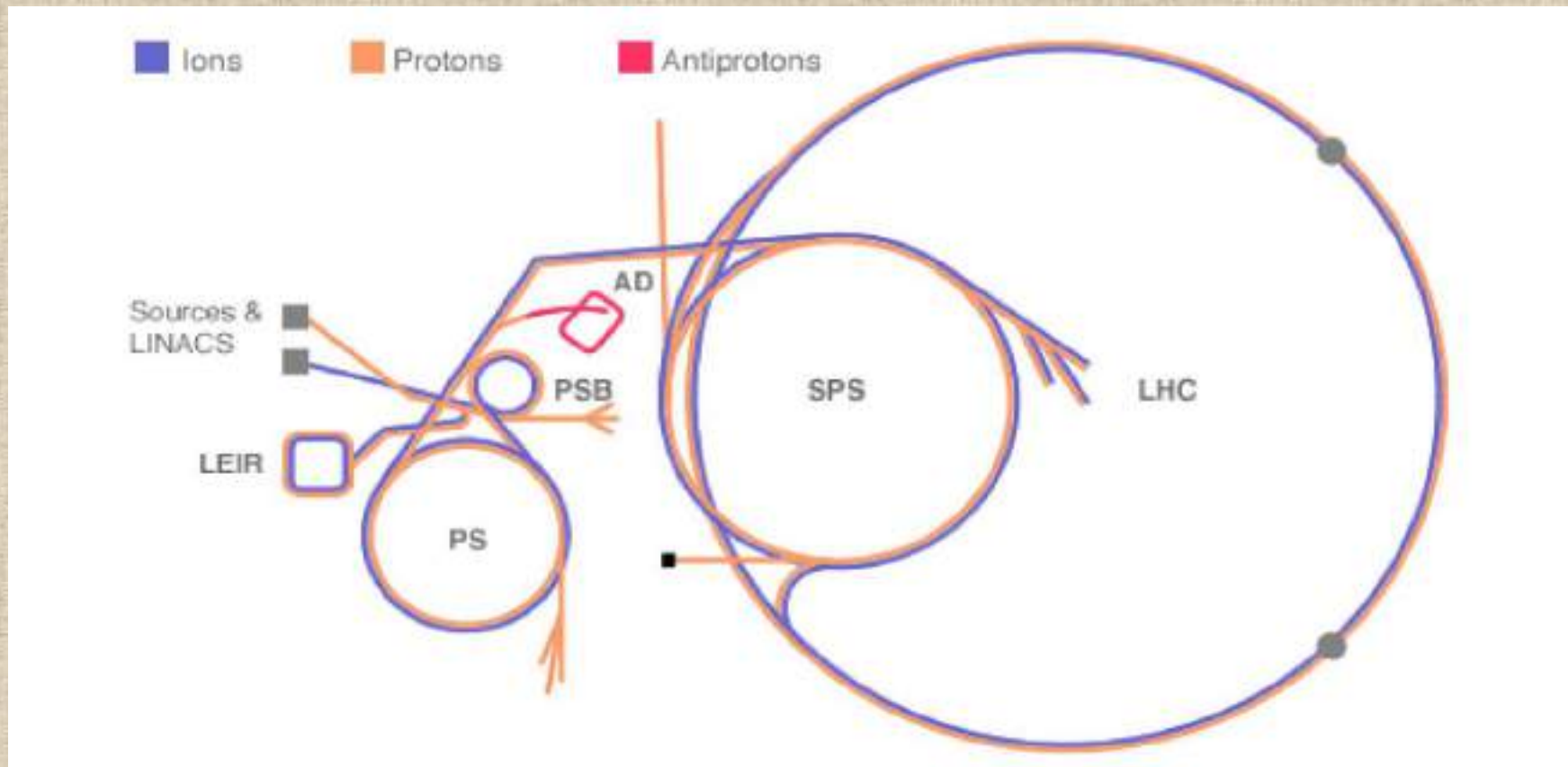


Simon Van Der Meer

# L'anello LEP al CERN (1989-2000)



# Il complesso di acceleratori al CERN



Il tunnel del LEP (Large Electron Positron collider) viene riutilizzato per far collidere protoni oppure ioni pesanti nel Large Hadron Collider (LHC)

---

Lago Lemano

Aeroporto di Ginevra

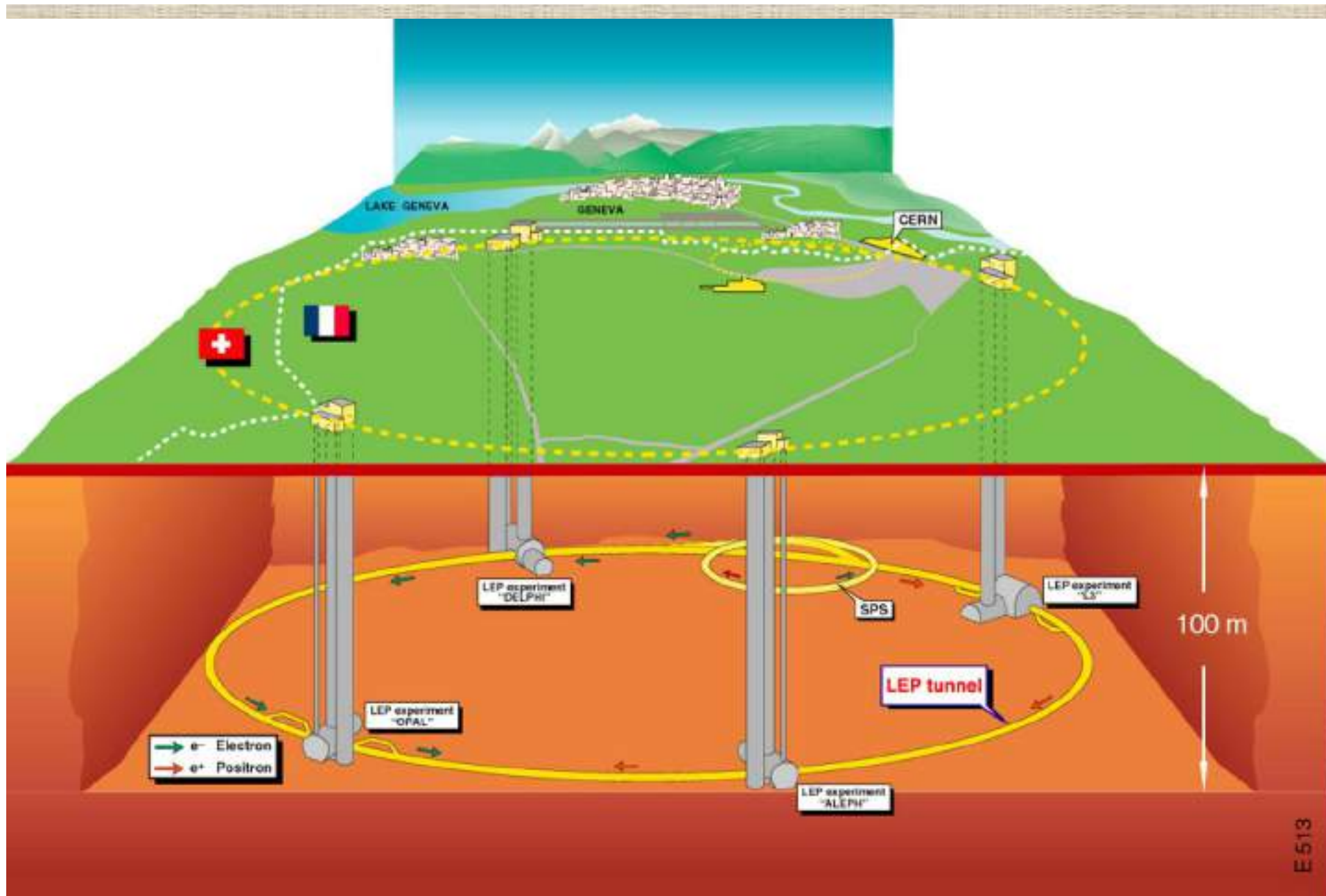


**LEP ( 27 Km )**

**SPS ( 7 Km )**

**CERN**

Al LEP il Modello Standard è stato messo “sotto torchio” in un modo sistematico e vario senza precedenti.






La nuova macchina  
del CERN:  
il **Large Hadron Collider**

LHC è situato al CERN in un tunnel di 27 km di circonferenza, tra 50 e 175 m sottoterra

- **Alta energia:**  
 $\sqrt{s} = 14 \text{ TeV (7+7)}$   
7 volte maggiore dell'acceleratore fino ad oggi  
più potente (Tevatron al Fermilab)  
→ Ricerca di nuove particelle in regimi inesplorati





La nuova macchina  
del CERN:  
il **Large Hadron Collider**

**Tecnologie al limite  
del possibile**

Superconduttività (13kA, 7MJoules)

Criogenia (1.9 K)

Magneti ( $8 \cdot 10^4$  T)

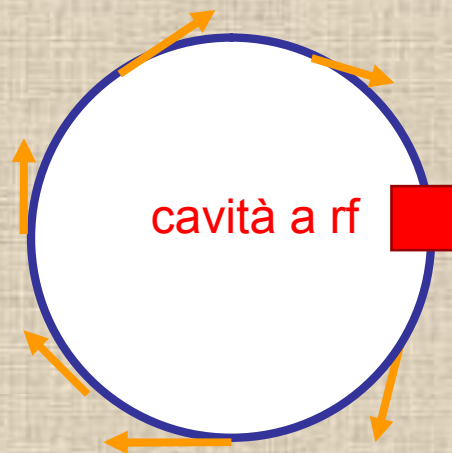
Vuoto ( $10^{-12}$  Torr)

# Radiazione di sincrotrone

Una particella carica che viaggia in una traiettoria curva **emette fotoni**, la cui energia dipende dalla massa e dall'energia della particella e dal raggio di curvatura della traiettoria

Una particella carica che viaggia in una traiettoria curva **perde energia**.

In un anello di accumulazione l'energia persa viene compensata dalle cavità a radiofrequenza



$$U = \frac{4\pi}{3} \frac{r_o}{(mc^2)^3} \frac{E^4}{\rho}$$

*Energia emessa per giro*

Le particelle **più leggere** emettono **più energia**.

Come sorgenti di radiazione vengono usati acceleratori di **elettroni** o **positroni**