

A detailed photograph of particle accelerator components, showing large, curved, metallic structures with a blue and purple glow, likely representing the LHC or a similar facility.

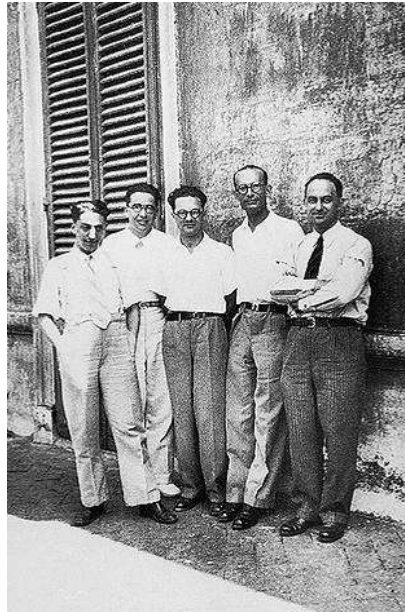
Gli acceleratori di particelle: da microscopi subatomici a strumenti per la medicina

*David Alesini
(LNF-INFN, Frascati)*

7 Science
Matinées

Ente pubblico di ricerca che promuove, coordina ed effettua

- la ricerca scientifica nel campo della **fisica subnucleare, nucleare ed astroparticellare**
- la ricerca e lo **sviluppo tecnologico** necessari alle attività in tali settori
- in stretta **collaborazione con l'Università**
- e nel contesto della collaborazione e del confronto internazionale
- Sotto il controllo del Ministero dell'Università e della Ricerca MIUR



1951

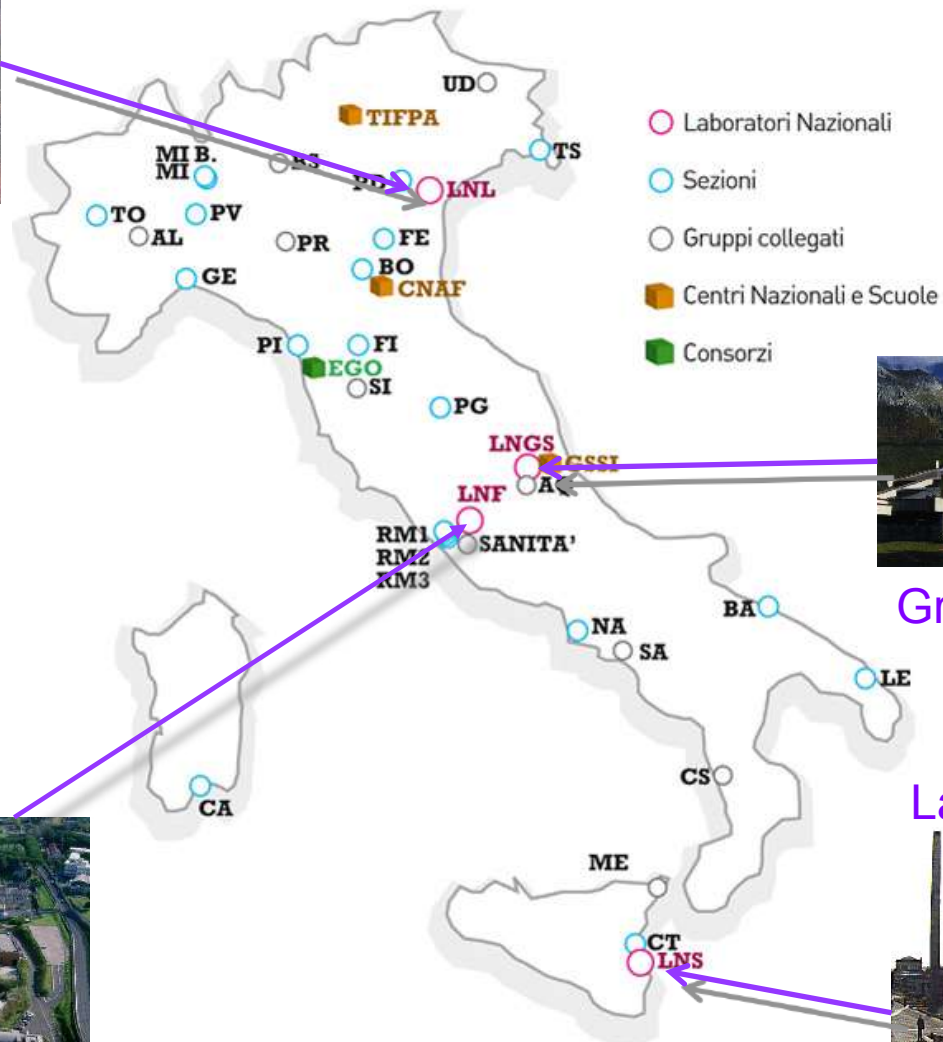
4 Sezioni universitarie
Milano, Torino, Padova, e
Roma

1957

Nascono i Laboratori Nazionali di
Frascati (LNF)

INFN OGGI

Legnaro



Gran Sasso

Frascati

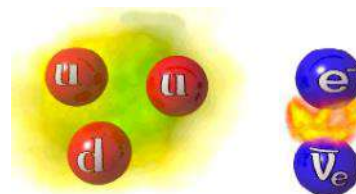


Laboratori del Sud



Attività dei LNF

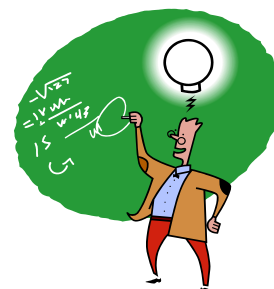
Studi sulla struttura intima della materia



Ricerca di onde gravitazionali



Elaborazione di modelli teorici



Sviluppo e costruzione di rivelatori di particelle



Studi di materiali e ricerche biomediche con luce di sincrotrone



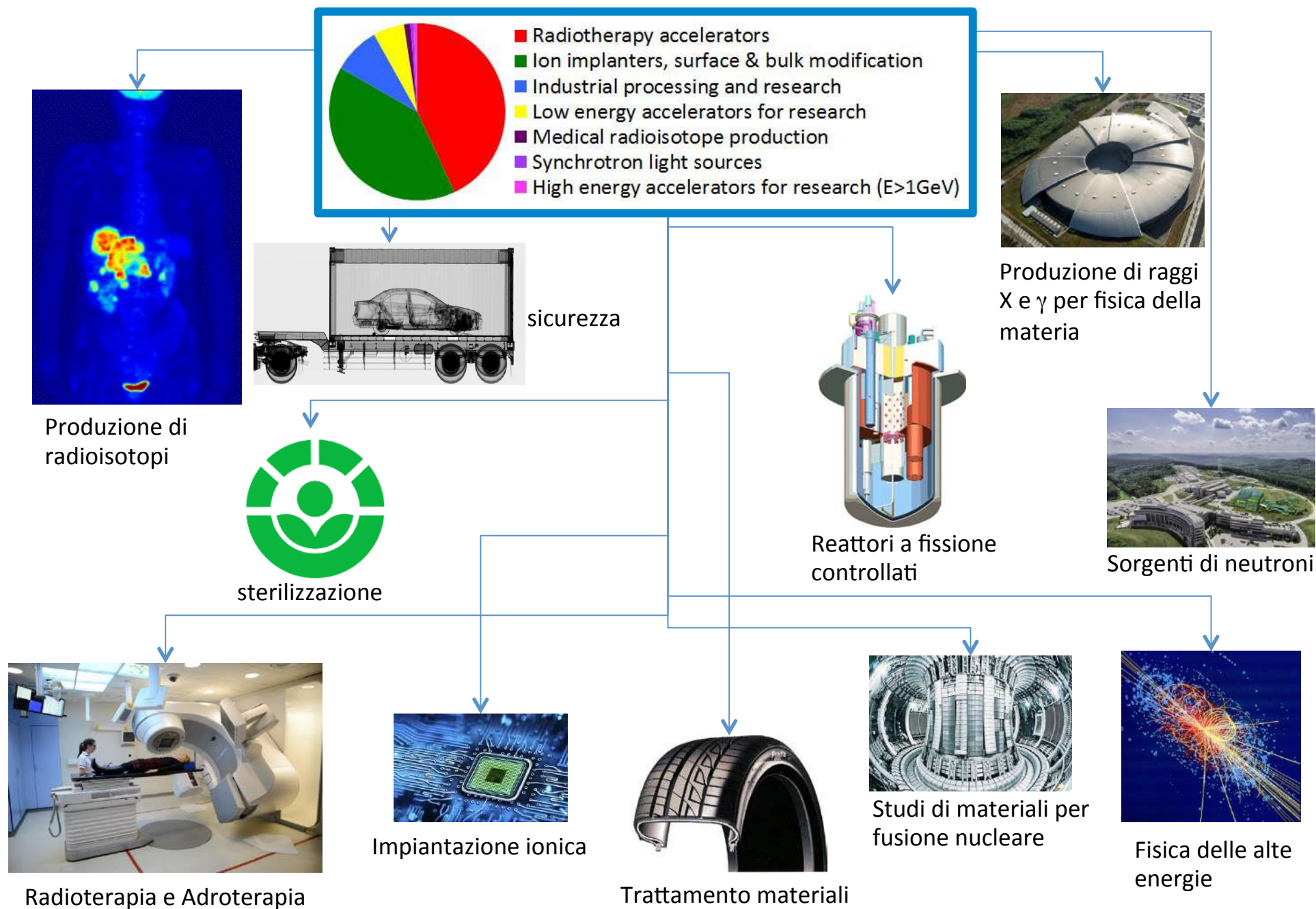
Sviluppo e supporto di sistemi di calcolo e reti



Studio e sviluppo di tecniche acceleratrici

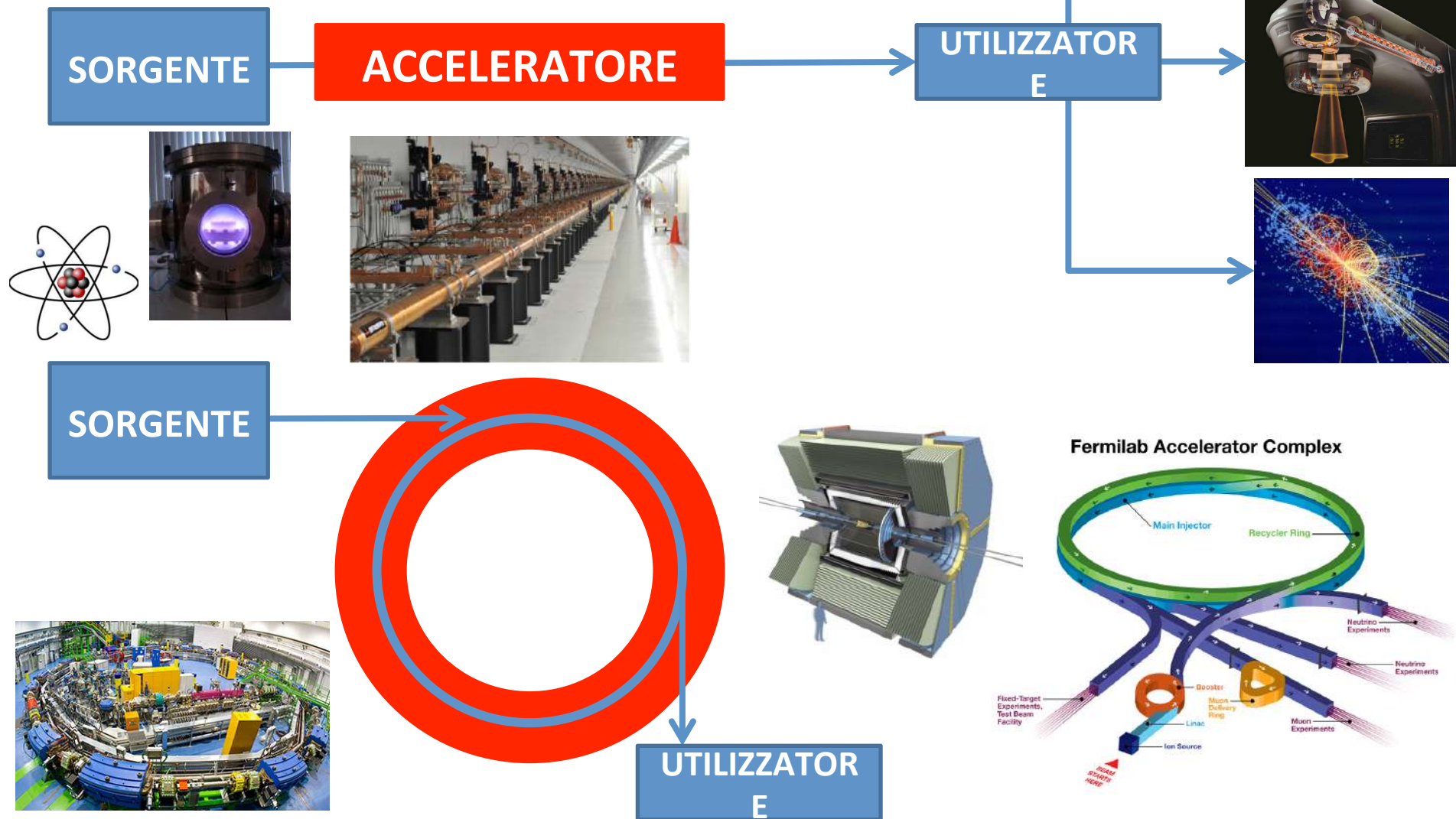


A COSA SERVONO GLI ACCELERATORI DI PARTICELLE?

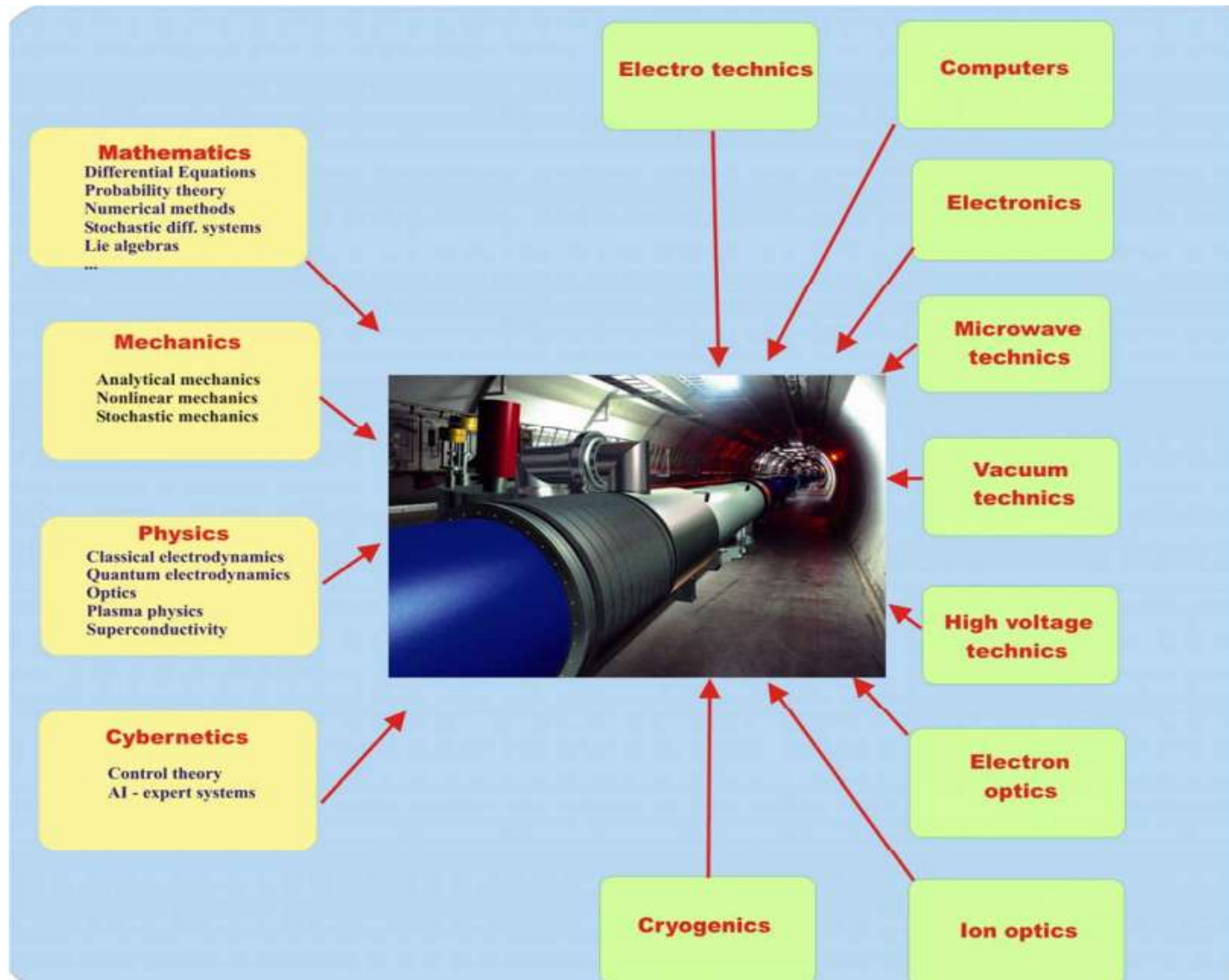


COME FUNZIONANO GLI ACCELERATORI DI PARTICELLE?

Un acceleratore di particelle può essere considerato come un **dispositivo che trasferisce energia a particelle cariche** (elettroni, protoni, ioni,...) attraverso campi elettro-magnetici.

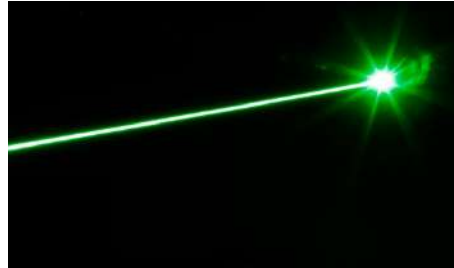
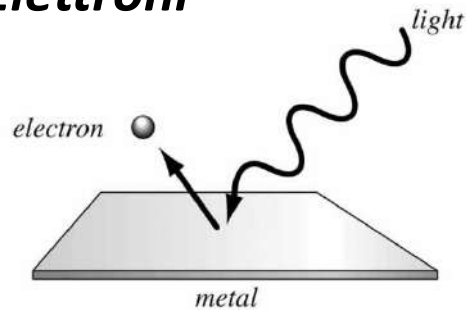


Interdisciplinarieta della fisica e tecnologia degli acceleratori di particelle

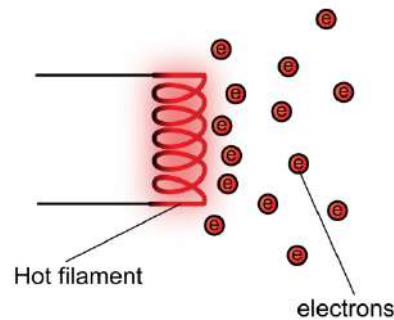


SORGENTI DI PARTICELLE

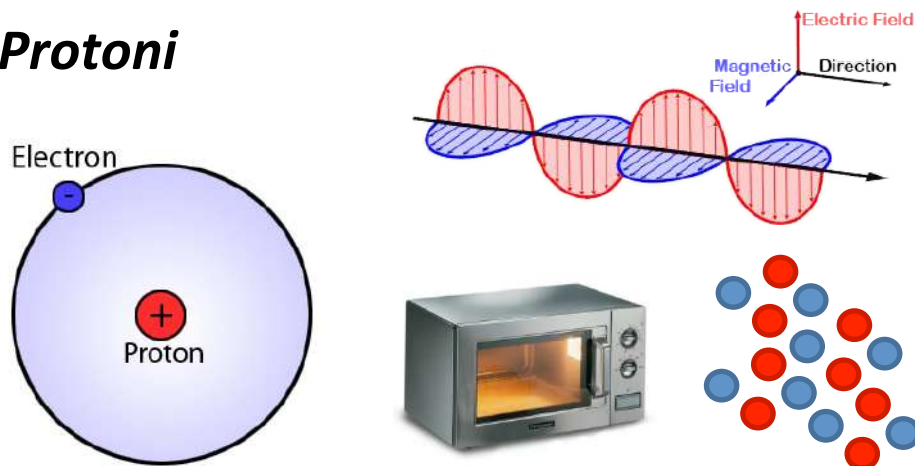
Elettroni



Gli **Elettroni** possono essere prodotti attraverso impulsi di luce laser che colpiscono una superficie metallica (effetto **foto-elettrico**) o filamenti portati all'incandescenza (**effetto termoionico**).



Protoni



I **protoni** possono essere generati a partire da molecole di **idrogeno** che vengono portate allo stato di plasma da sorgenti a radiofrequenza

BASIC EQUATION FOR PARTICLE ACCELERATORS

Beams of charged particles are accelerated with the use of **electric fields** and are deflected, curved, and focused with the use of **magnetic fields**. The basic equation for the description of the acceleration and focusing processes is represented by the **Lorentz Force**.

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

$\vec{p}$ = momentum

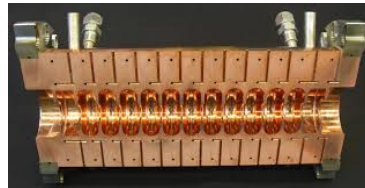
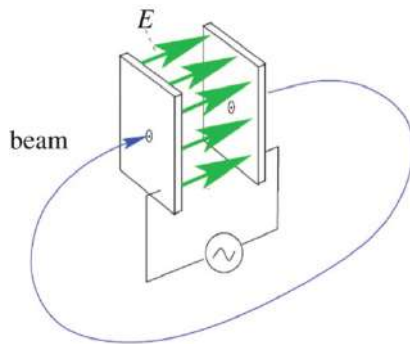
m = mass

$\vec{v}$ = velocity

q = charge

ACCELERATION

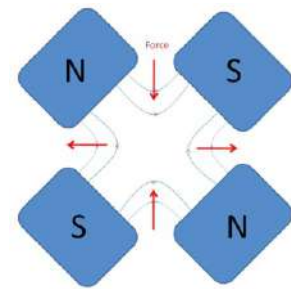
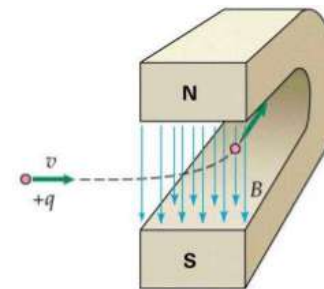
To accelerate, we need a force in the direction of motion



Longitudinal Dynamics

BENDING AND FOCUSING

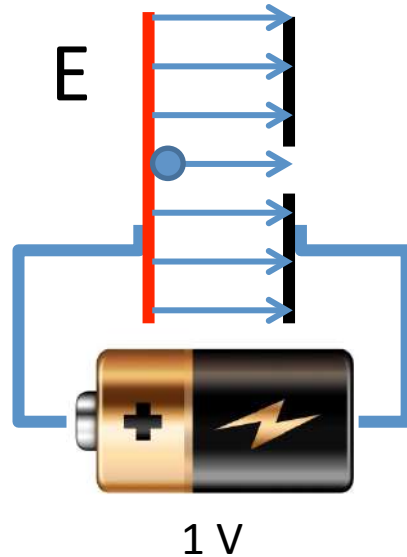
2nd term always perpendicular to motion => no energy gain



Transverse Dynamics

ACCELERAZIONE DI PARTICELLE: CAMPO ELETTRICO

Le particelle vengono accelerate con l'utilizzo di **campi elettrici**



Guadagno di Energia $\propto$ ddp (V)

$10^9\text{-}10^{10}\text{ V}$



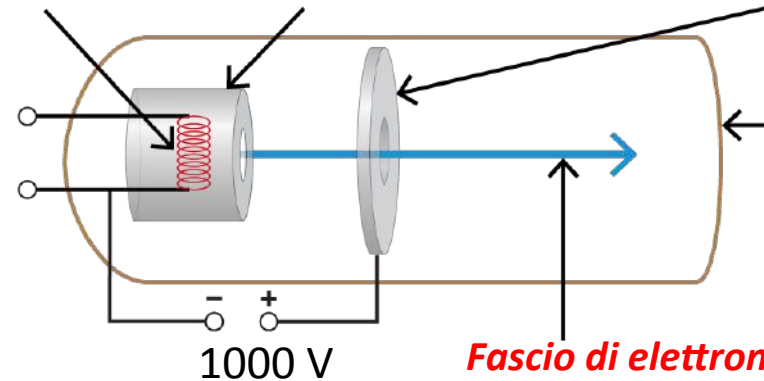
*Filamento
incandescente*

catodo

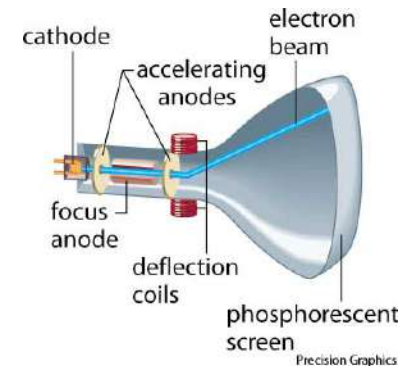
anodo

*Camera
da vuoto*

Fascio di elettroni



220 V

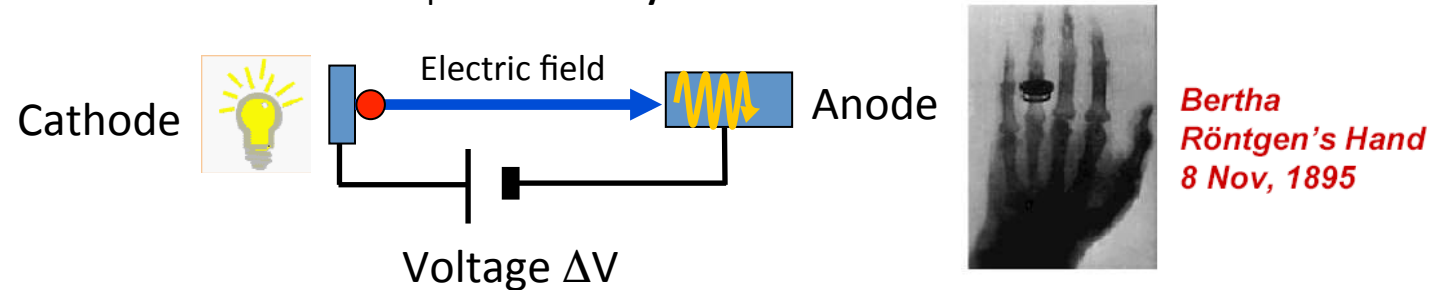


10^5 V



ACCELERATION: SIMPLE CASE

The **first historical linear particle accelerator** was built by the Nobel prize Wilhelm Conrad Röntgen (1900). It consisted in a vacuum tube containing a cathode connected to the negative pole of a DC voltage generator. **Electrons emitted by the heated cathode** were accelerated while flowing to another electrode connected to the positive generator pole (anode). Collisions between the energetic electrons and the anode produced **X-rays**.



The **energy gained** by the electrons travelling from the cathode to the anode is equal to their charge multiplied the DC voltage between the two electrodes.

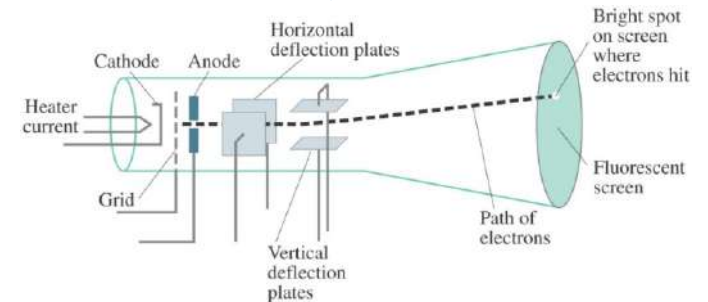
$$\frac{d\vec{p}}{dt} = q\vec{E} \Rightarrow \Delta E = q\Delta V$$

$\vec{p}$ = momentum

q = charge

E = energy

Particle energies are typically expressed in electron-volt [eV], equal to the energy gained by 1 electron accelerated through an electrostatic potential of 1 volt:
 $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$



PARTICLE VELOCITY VS ENERGY: LIGHT AND HEAVY PARTICLES

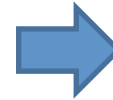
Single particle

- rest mass m_0
- rest energy $E_0 (=m_0c^2)$
- total energy E
- mass m
- velocity v
- momentum $p (=mv)$
- Kinetic energy $W=E-E_0$

Relativistic factor
 $\beta=v/c (<1)$

Relativistic factor
 $\gamma=E/E_0 (\geq 1)$

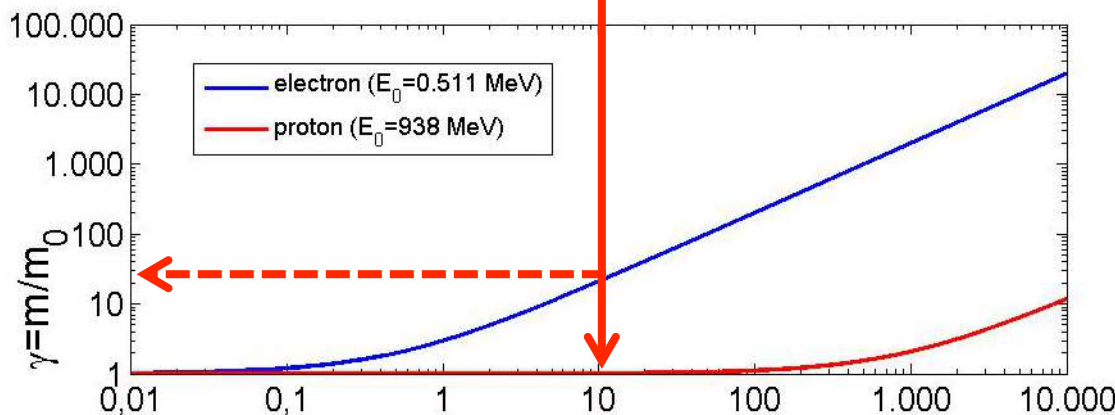
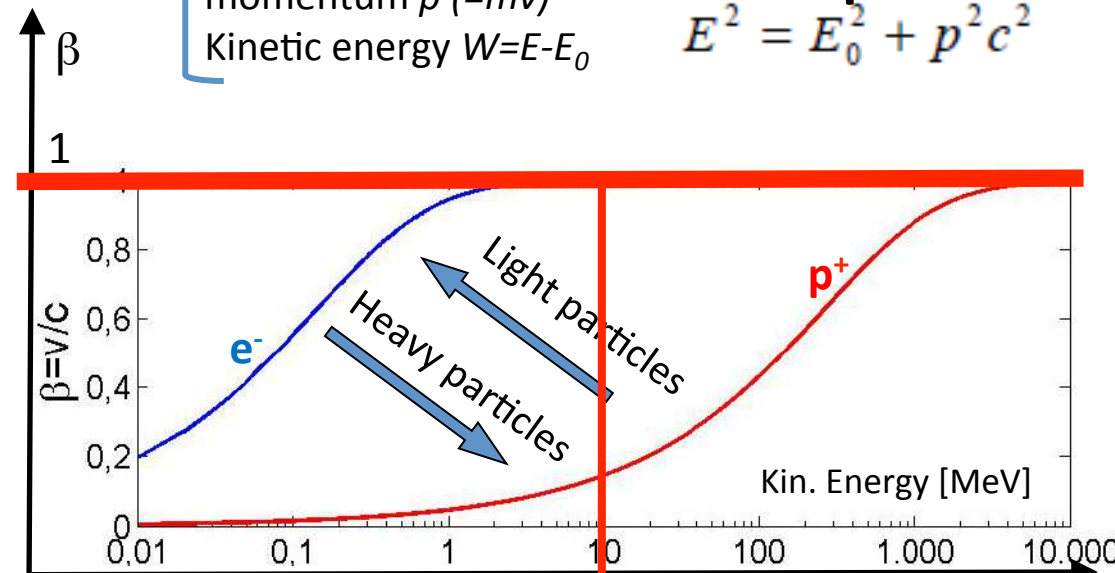
$$E^2 = E_0^2 + p^2 c^2$$



$$\begin{cases} \beta = \sqrt{1 - 1/\gamma^2} \\ \gamma = 1/\sqrt{1 - \beta^2} \end{cases} \quad (m = \gamma m_0)$$

$$W = (\gamma - 1)m_0c^2 \approx \frac{1}{2}m_0v^2 \quad \text{if } \beta \ll 1$$

$$\beta = \sqrt{1 - \frac{1}{\gamma^2}} = \sqrt{1 - \left(\frac{E_0}{E}\right)^2} = \sqrt{1 - \left(\frac{E_0}{E_0 + W}\right)^2}$$



⇒ **Light particles** (as **electrons**) are practically fully relativistic ($\beta \approx 1$, $\gamma \gg 1$) at relatively low energy and **reach a constant velocity** ($\sim c$). The acceleration process occurs at constant particle velocity

⇒ **Heavy particles** (protons and ions) are typically weakly relativistic and **reach a constant velocity only at very high energy**. The velocity changes a lot during acceleration process.



⇒ This implies **important differences** in the technical characteristics of the **accelerating structures**. In particular for protons and ions we need different types of accelerating structures, **optimized for different velocities** and/or the accelerating structure has to vary its geometry to take into account the velocity variation.

ELECTROSTATIC ACCELERATORS

To increase the achievable maximum energy, Van de Graaff invented an electrostatic generator based on a **dielectric belt** transporting positive charges to an isolated electrode hosting an **ion source**. The positive ions generated in a large positive potential were accelerated toward ground by the static electric field.

LIMITS OF ELECTROSTATIC ACCELERATORS

DC voltage as large as **~10 MV** can be obtained ($E \sim 10$ MeV). The main limit in the achievable voltage is the **breakdown** due to **insulation** problems.

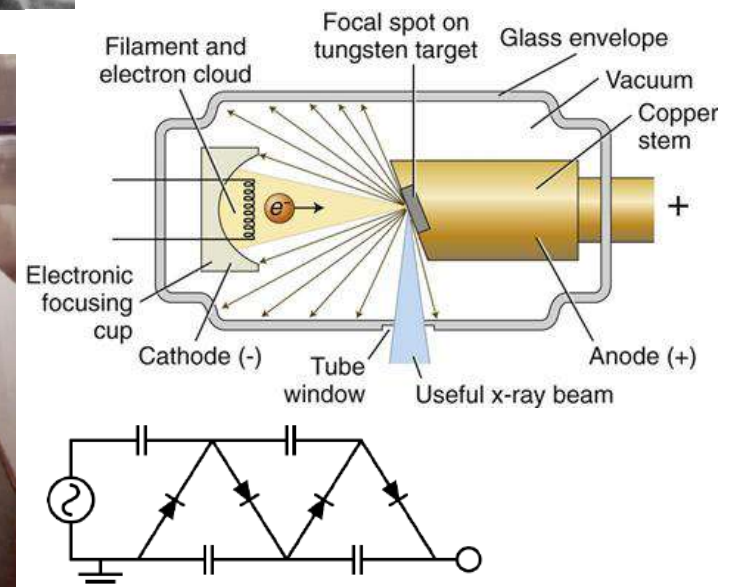
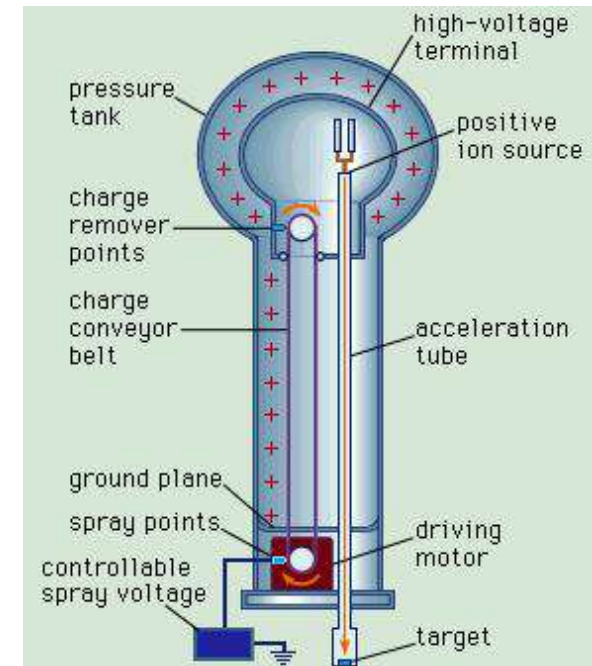
APPLICATIONS OF DC ACCELERATORS

DC particle accelerators are in operation worldwide, typically at $V < 15$ MV ($E_{\max} = 15$ MeV), $I < 100$ mA.

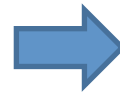
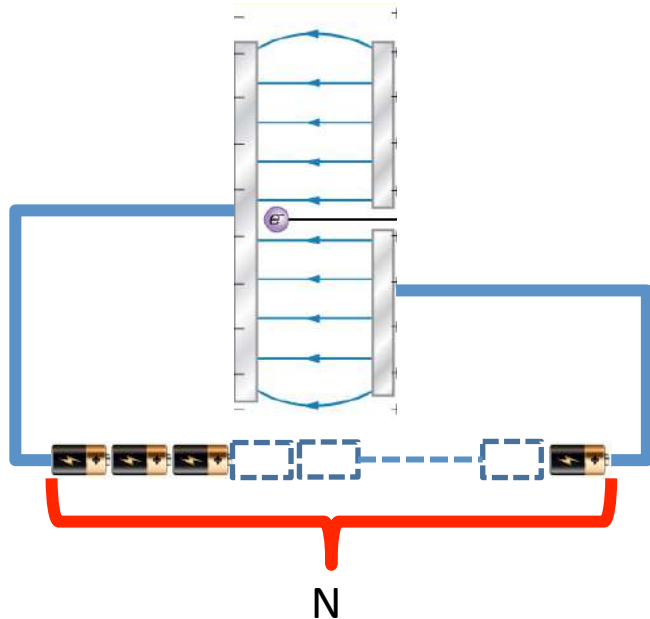
They are used for:

- ⇒ *material analysis*
- ⇒ *X-ray production*,
- ⇒ *ion implantation for semiconductors*
- ⇒ *first stage of acceleration (particle sources)*

750 kV Cockcroft-Walton
Linac2 injector at CERN from 1978
to 1992

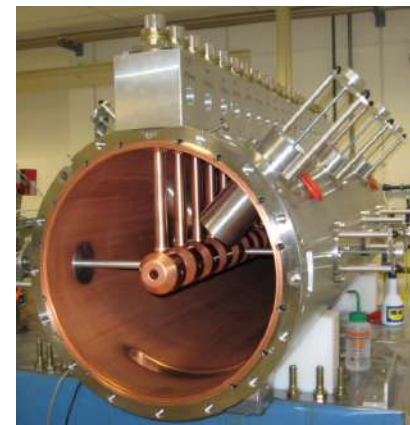


ACCELERAZIONE DI PARTICELLE CON CAMPI ELETTROSTATICI E A RADIOFREQUENZA



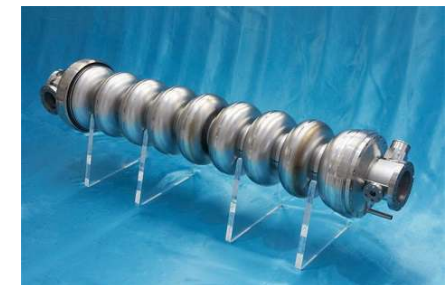
$V < 5 \text{ MV}$ (10^6 V)

Campi variabili (a radiofrequenza)



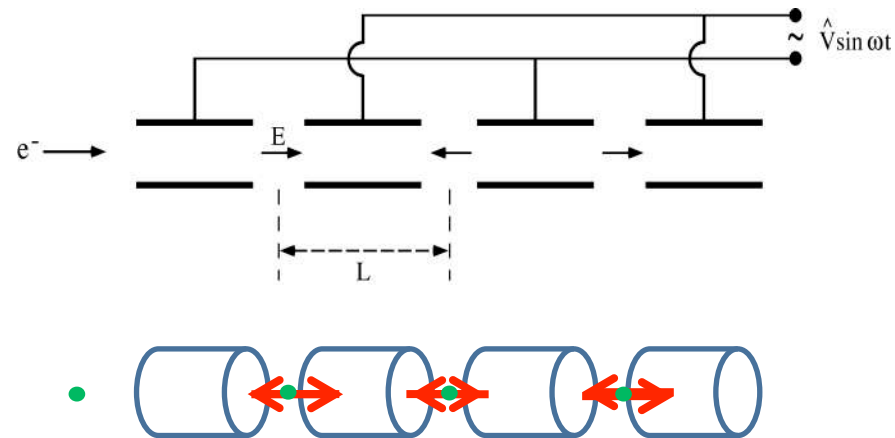
Si possono ottenere tensioni equivalenti fino a 100 MV/m

In tali strutture la massima energia è teoricamente limitata soltanto dalla massima lunghezza dell'acceleratore



RF ACCELERATORS : WIDERÖE “DRIFT TUBE LINAC” (DTL)

Basic idea: the particles are accelerated by the electric field in the gap between electrodes connected alternatively to the poles of an AC generator. This original idea of **Ising** (1924) was implemented by **Wideroe** (1927) who applied a sine-wave voltage to a sequence of **drift tubes**. The particles **do not experience any force while travelling inside the tubes** (equipotential regions) and are **accelerated across the gaps**. This kind of structure is called **Drift Tube LINAC (DTL)**.

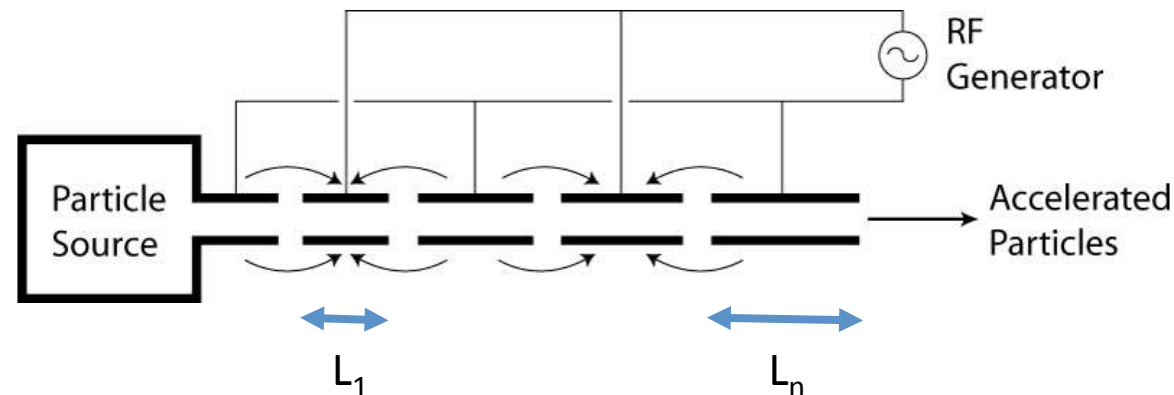


Rolf Wideroe

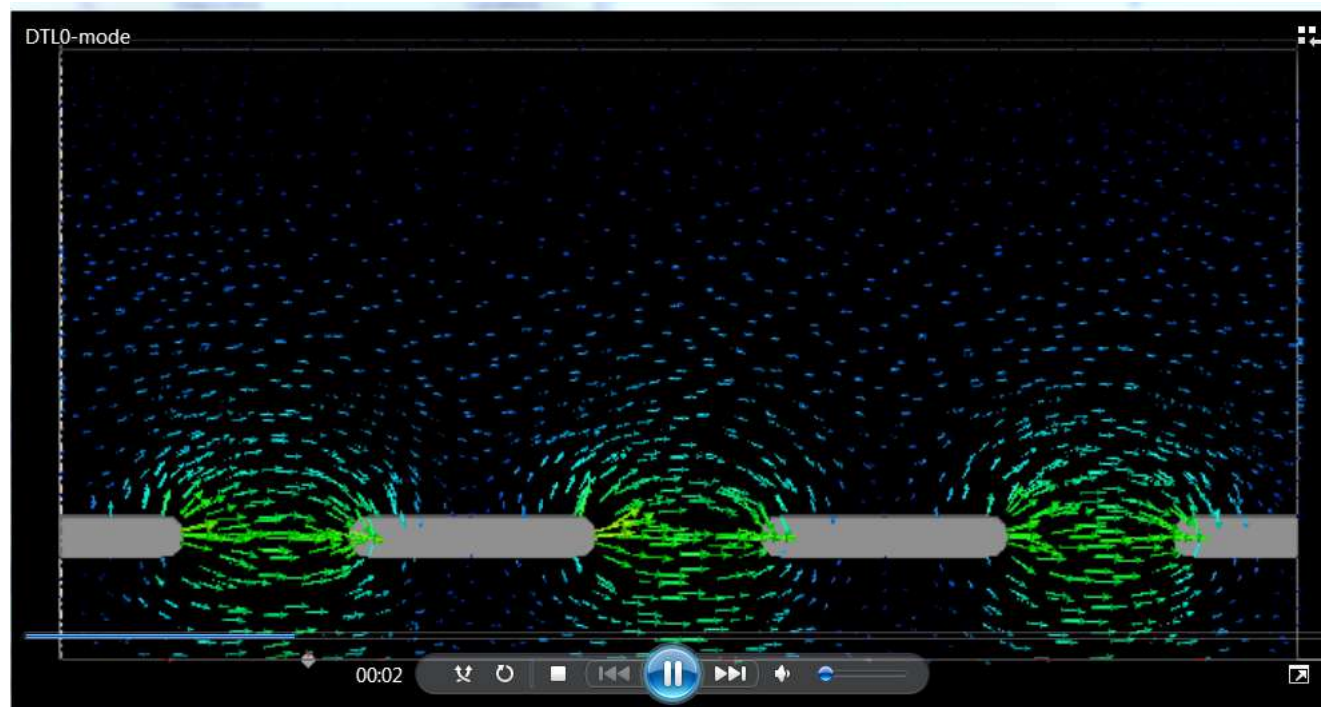
⇒ If the **length of the tubes** increases with the particle velocity during the acceleration such that the time of flight is kept constant and equal to half of the RF period, the particles are subject to a **synchronous accelerating voltage** and experience an energy gain of $\Delta E = q\Delta V$ at each gap crossing.

⇒ In principle a single **RF generator** can be used to indefinitely accelerate a beam, **avoiding the breakdown limitation** affecting the electrostatic accelerators.

⇒ The Wideroe LINAC is the **first RF LINAC**

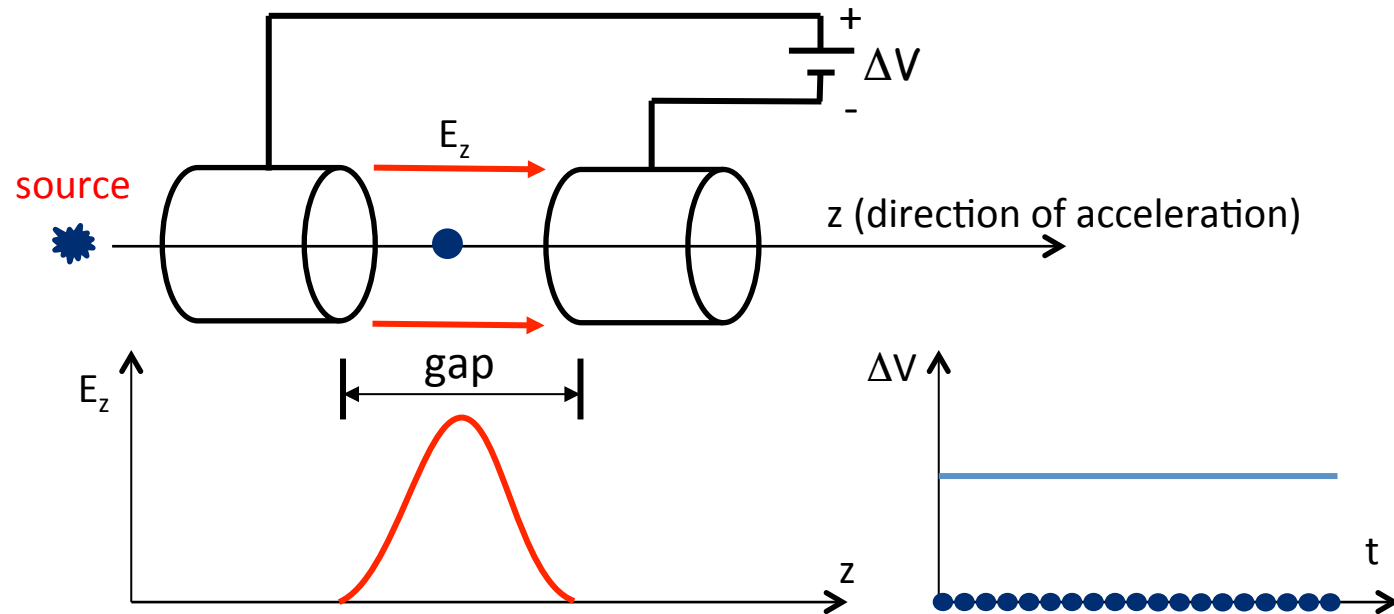


DTL: video



ELECTROSTATIC ACCELERATION: CONTINUOUS BEAM

We consider the acceleration between two electrodes in DC.



$$E^2 = E_0^2 + p^2 c^2 \Rightarrow 2E dE = 2p dp c^2 \Rightarrow dE = v \frac{mc^2}{E} dp \Rightarrow dE = v dp$$

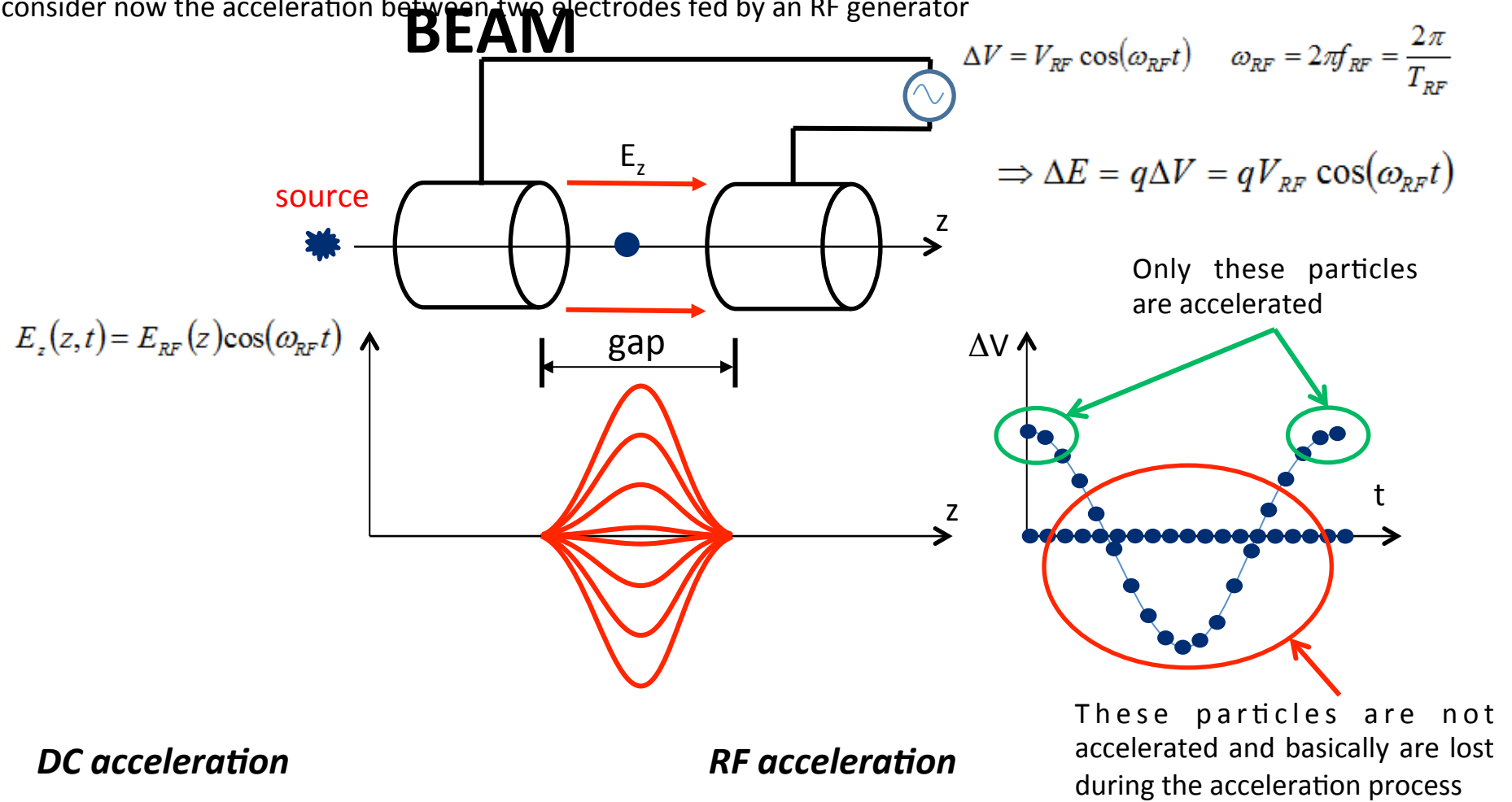
$$\frac{dp}{dt} = qE_z \Rightarrow v \frac{dp}{dz} = qE_z \Rightarrow \boxed{\frac{dE}{dz} = qE_z} \quad \left(\text{and also } \frac{dW}{dz} = qE_z \right) \quad W = E - E_0$$

rate of energy gain per unit length

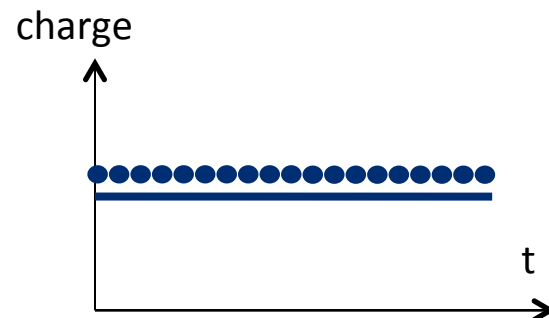
$$\Rightarrow \Delta E = \int_{\text{gap}} \frac{dE}{dz} dz = \int_{\text{gap}} qE_z dz \Rightarrow \boxed{\Delta E = q\Delta V} \quad \text{energy gain per electrode}$$

RF ACCELERATION: BUNCHED

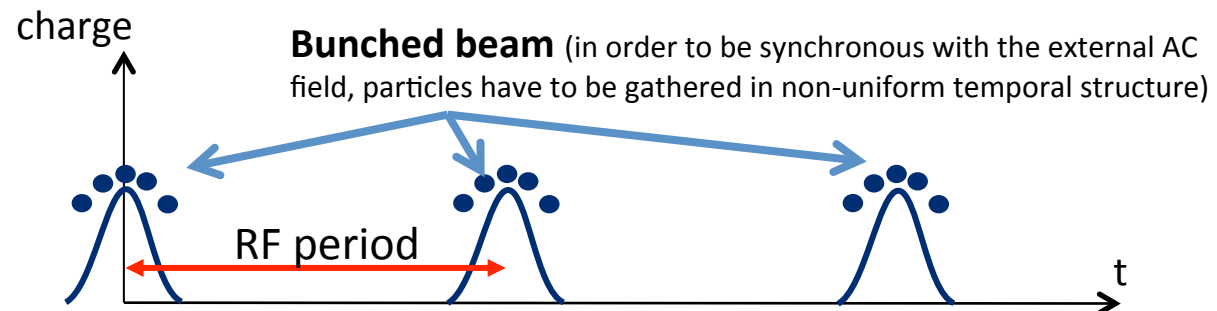
We consider now the acceleration between two electrodes fed by an RF generator



DC acceleration

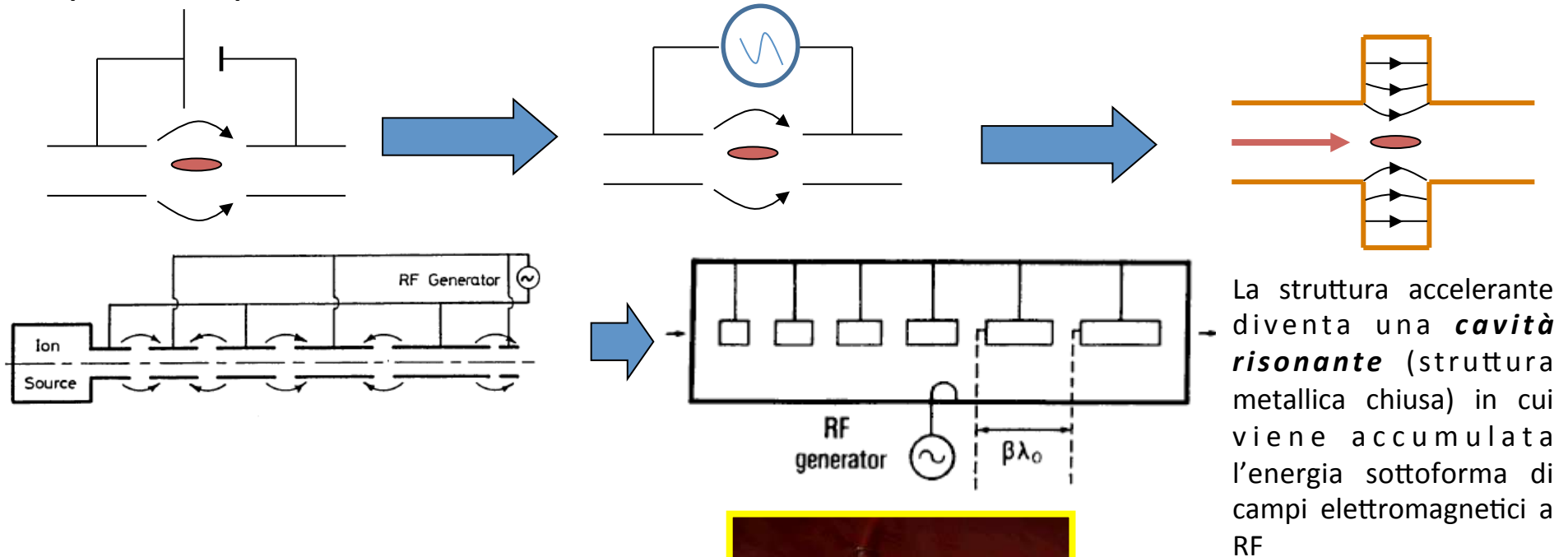


RF acceleration

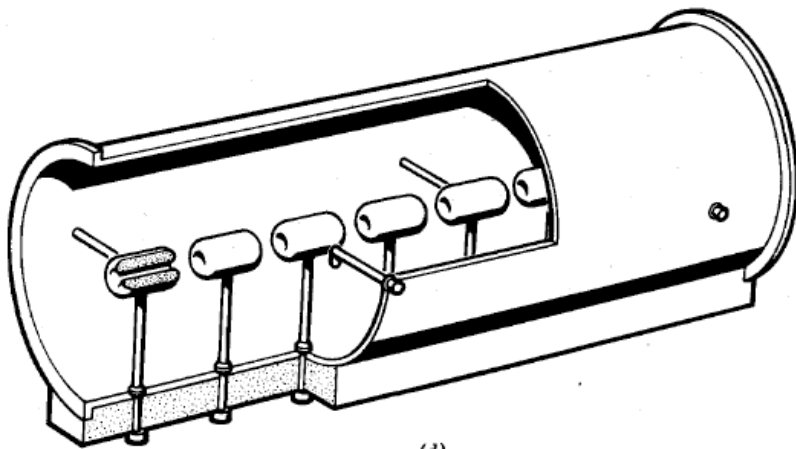


Accelerazione con campi elettrici a radiofrequenza

Dall'idea di applicare, al posto di un campo elettrico statico, un campo oscillante con frequenza opportuna tale che la fase cambi di π durante il tempo di volo fra due gap successivi si è progressivamente passati al **concetto di accelerazione con campi a radiofrequenza**.



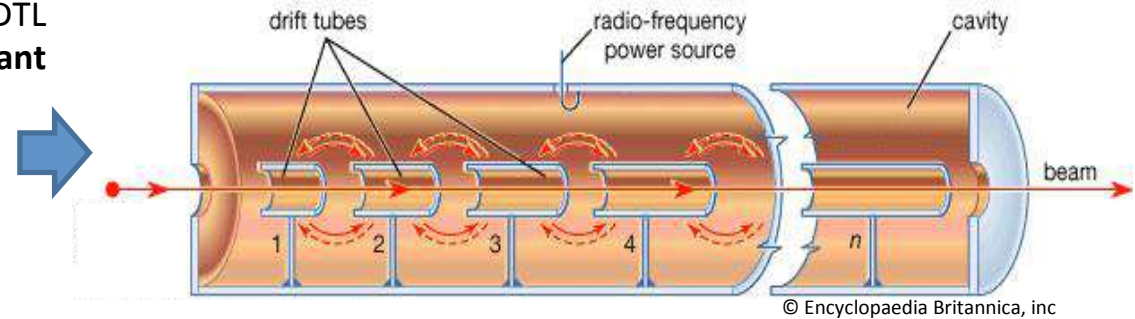
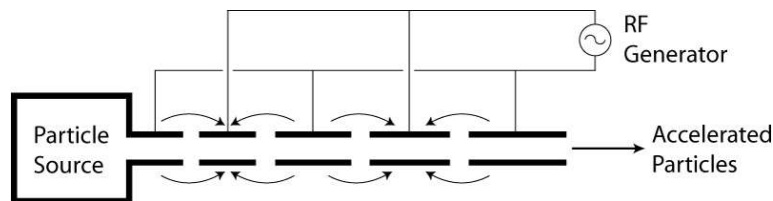
La struttura accelerante diventa una **cavità risonante** (struttura metallica chiusa) in cui viene accumulata l'energia sotto forma di campi elettromagnetici a RF



La **struttura di Alvarez** è basata su questo concetto ed è molto utilizzata nell'accelerazione di **protoni e ioni di bassa-media energia**. Essa può essere descritta come uno speciale DTL in cui gli elettrodi sono parte di una macrostruttura risonante.

ALVAREZ STRUCTURES

Alvarez's structure can be described as a special DTL in which the electrodes are part of a **resonant macrostructure**.



⇒The DTL operates in **0 mode** for protons and ions in the range $\beta=0.05-0.5$ ($f_{RF}=50-400$ MHz) 1-100 MeV;

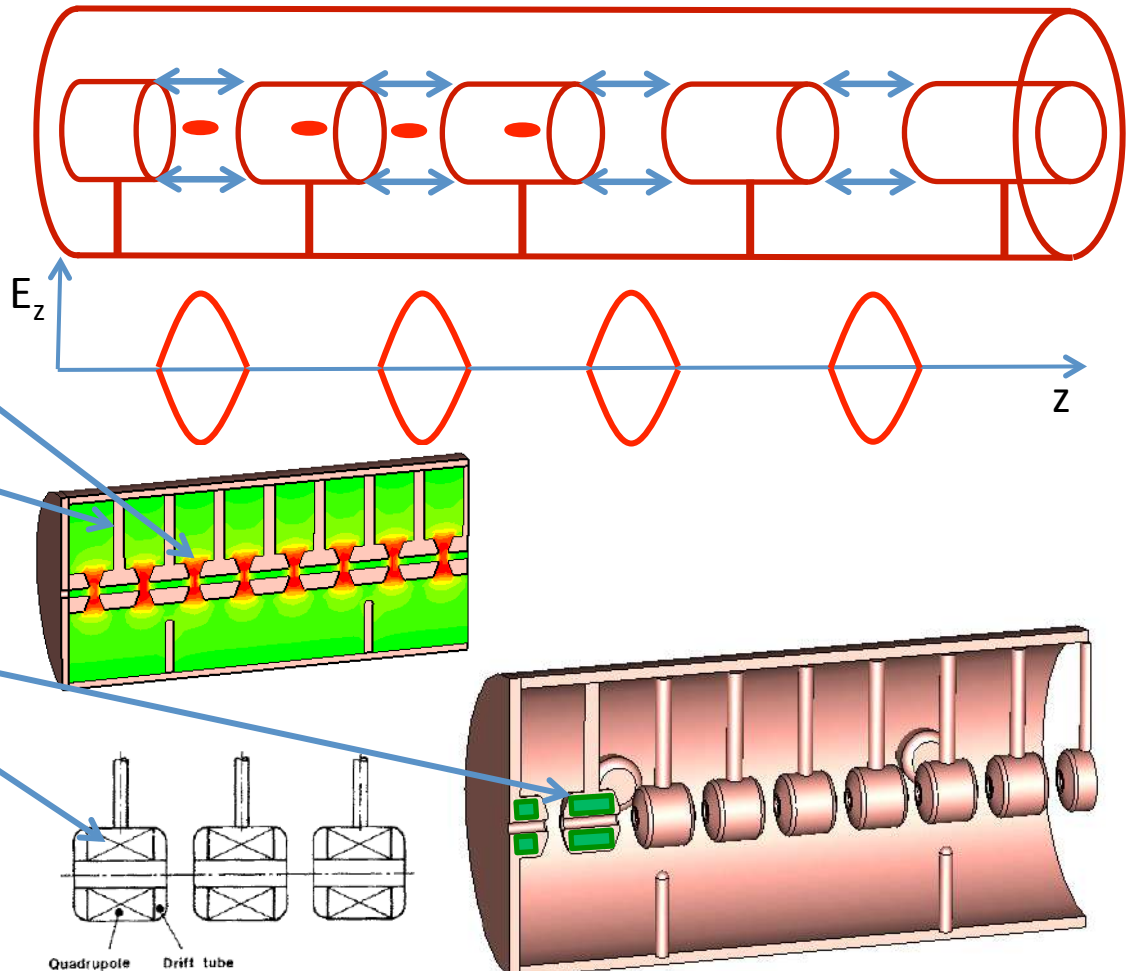
⇒The beam is inside the “**drift tubes**” when the electric field is decelerating. The **electric field** is concentrated between gaps;

⇒The drift tubes are suspended by **stems**;

⇒**Quadrupole** (for transverse focusing) can fit inside the drift tubes.

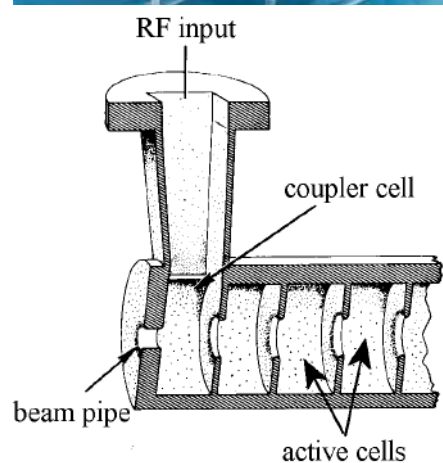
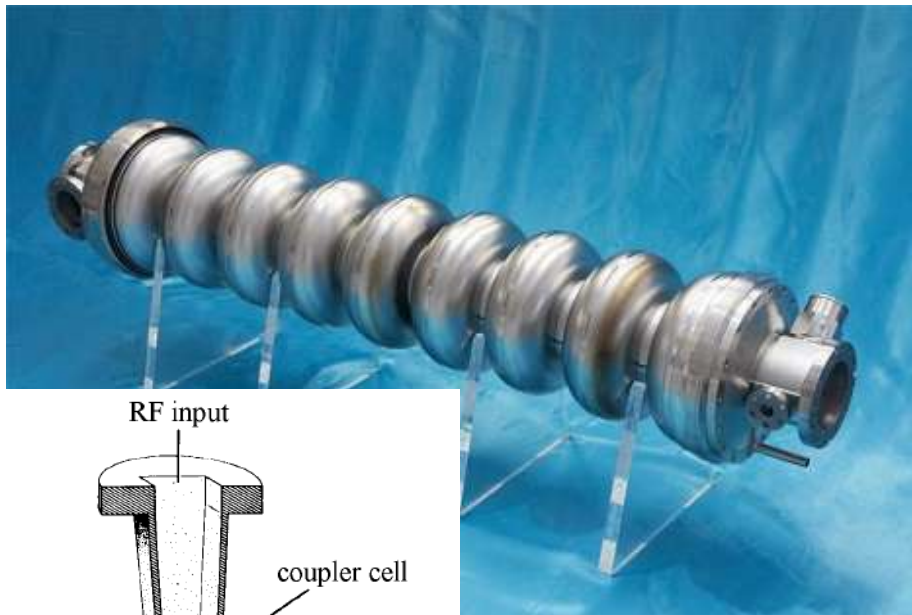
⇒In order to be synchronous with the accelerating field at each gap the **length of the n-th drift tube** L_n has to be:

$$L_n = \beta_n \lambda_{RF}$$



Cavità a Radiofrequenza

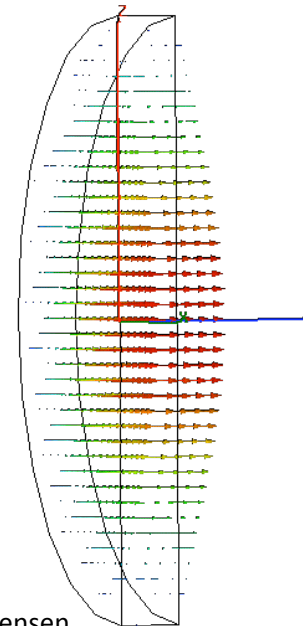
Nei LINACs le **cavità risonanti** sono quasi sempre raggruppate in **strutture multicella**. Questa scelta è motivata da ragioni di **economicità e compattezza**. In una struttura multicella un unico accoppiatore RF è sufficiente ad eccitare il campo. Questo implica l'uso di un numero ridotto di sorgenti di alta potenza RF, a beneficio della semplicità e dei costi dell'acceleratore. L'accoppiamento tra le celle si realizza attraverso **iridi** in ciascuna cella e/o attraverso aperture realizzate appositamente tra le celle (slots di accoppiamento).



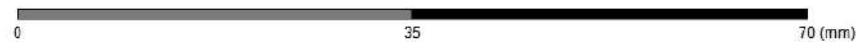
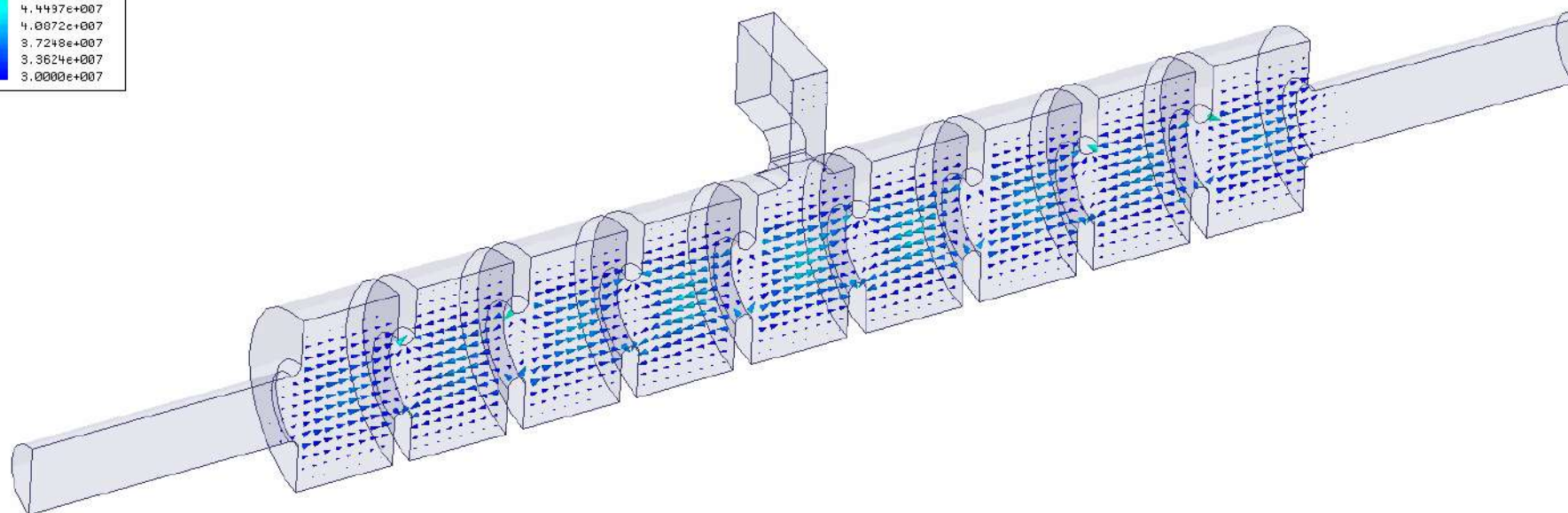
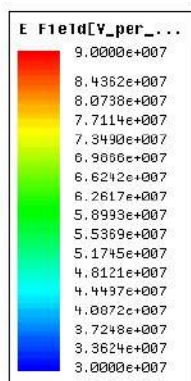
Le **frequenze di lavoro** possono andare dal MHz alla decina di GHz a seconda delle applicazioni

Esistono sia cavità che operano a **temperatura ambiente** (tipicamente in rame) che **cavità superconduttive** che operano a qualche K.

I **gradienti acceleranti medi** che si possono tipicamente ottenere sono dell'ordine di **qualche 10 MV/m**. Tali gradienti possono arrivare anche a **>100 MV/m**.



Courtesy E. Jensen



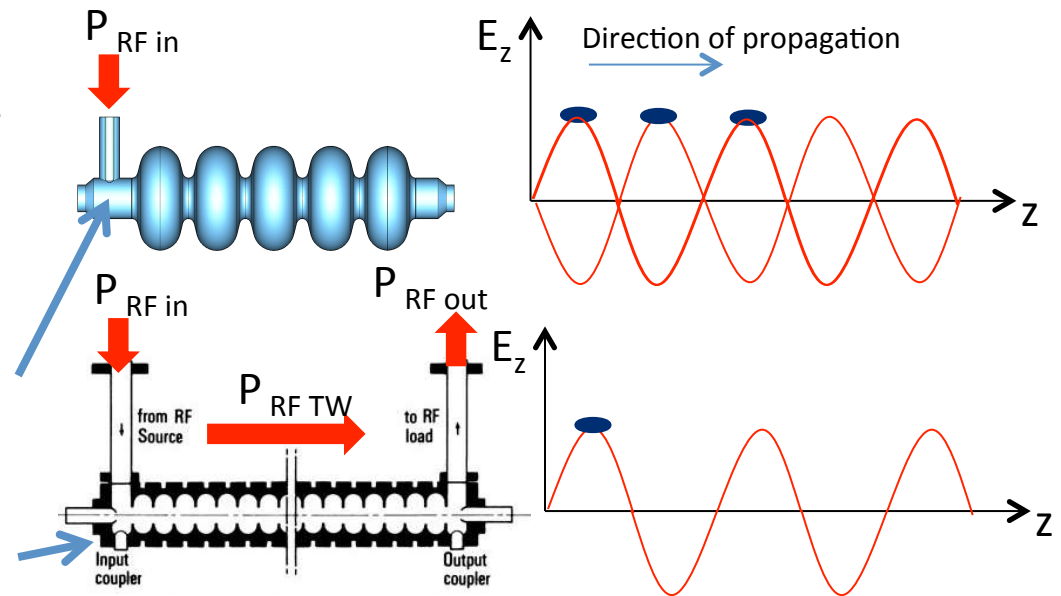
ACCELERATING CAVITIES

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

To accelerate charged particles, the RF wave must have an **electric field along the direction of propagation of the particle**. There are basically two possibilities:

1-Using **standing wave (SW)** TM010-like modes in a **resonant cavity** (or multiple resonant cavities) in which the beam is synchronous with the resonating field;

2-Using a **travelling wave (TW) disk loaded** structure operating on the TM01-like mode in which the RF wave is co-propagating with the beam with a phase velocity equal to the beam velocity (c for e^-).



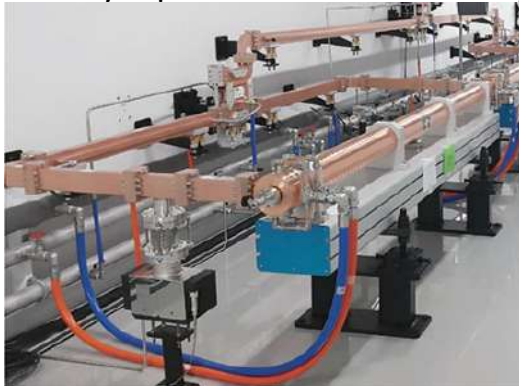
⇒ The structures are powered by RF generators (typically **klystrons**).

⇒ The cavities (and the related LINAC technology) can be of different material:

- copper for **normal conducting (NC, typically TW)** cavities;
- Niobium for **superconducting cavities (SC, typically SW)**;

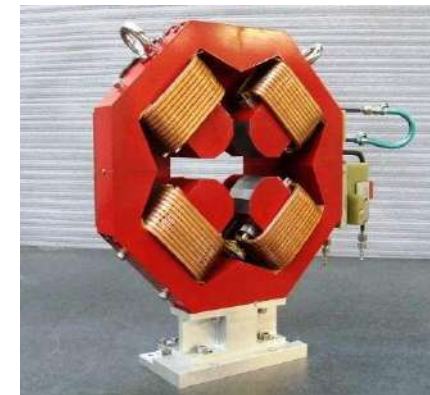
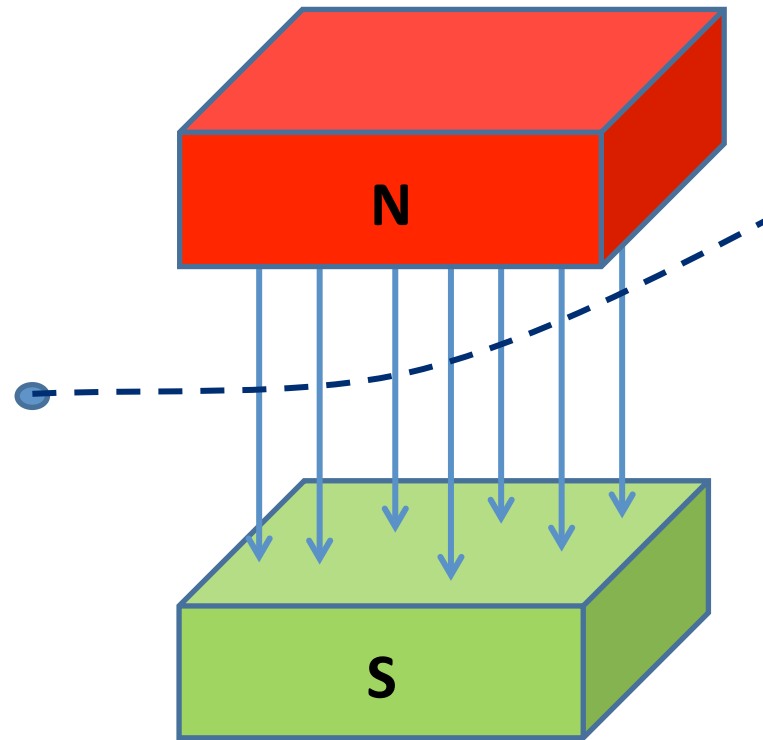
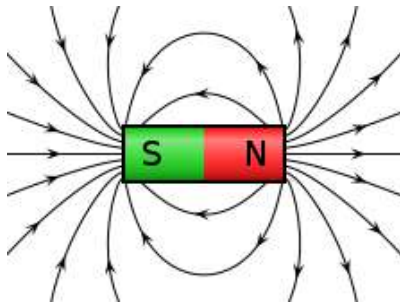
⇒ We can choose between NC or the SC technology depending on the required performances in term of:

- **accelerating gradient** (MV/m);
- **RF pulse length** (how many bunches we can contemporary accelerate);
- **Duty cycle**: pulsed operation (i.e. 10-100 Hz) or continuous wave (CW) operation;
- **Average beam current**.



COME SI CURVANO LE PARTICELLE: CAMPI MAGNETICI

Per curvare le particelle si utilizzano campi magneti generati da magneti permanenti o elettromagneti



QUADRUPOLO

Quando una **particelle carica** entra in un campo magnetico è soggetta ad una forza **ortogonale alla velocità della particella** e **proporzionale al campo magnetico esercitato**.

Magneti dipolari sono utilizzati per curvare le particelle

Magneti quadrupolari per focalizzarle

LORENTZ FORCE: ACCELERATION AND FOCUSING

Particles are accelerated through electric field and are bended and focalized through magnetic field.
The basic equation that describe the acceleration/bending /focusing processes is the **Lorentz Force**.

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

$\vec{p}$ = momentum

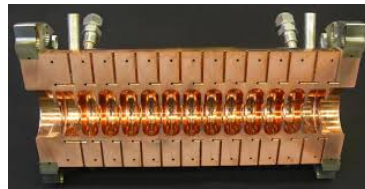
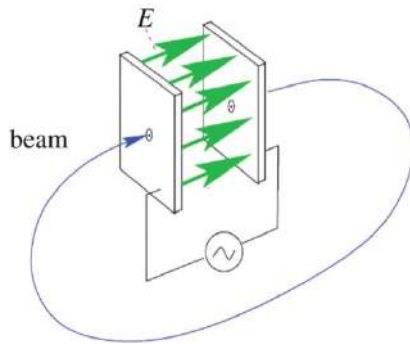
m = mass

$\vec{v}$ = velocity

q = charge

ACCELERATION

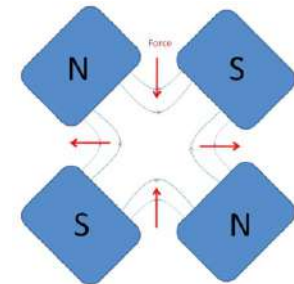
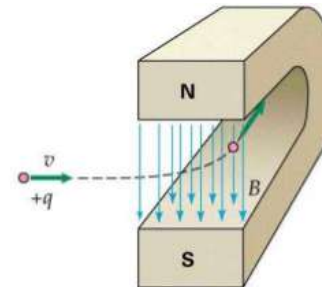
To accelerate, we need a force in the direction of motion



Longitudinal Dynamics

BENDING AND FOCUSING

2nd term always perpendicular to motion => no energy gain



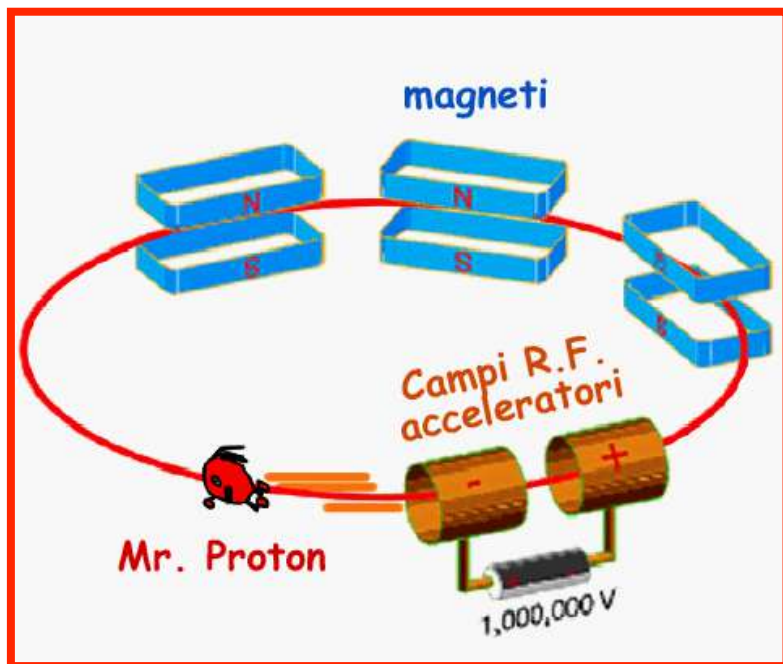
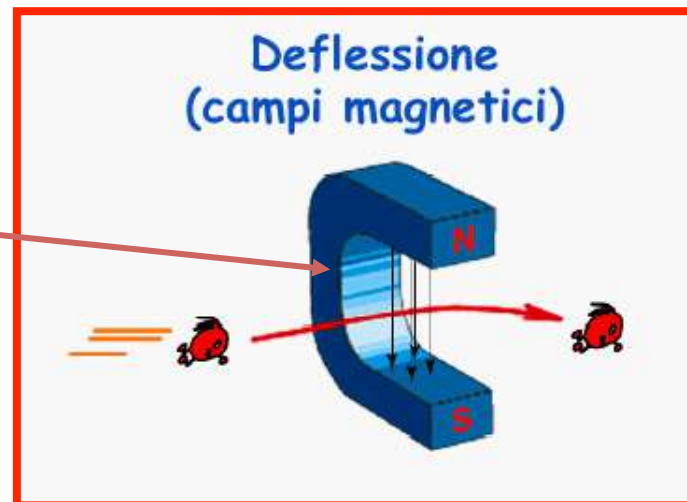
Transverse Dynamics

CAMPI MAGNETICI: DEFLESSIONE E FOCALIZZAZIONE

Con *i campi magnetici* è possibile far curvare le particelle cariche in movimento a velocità v ed è possibile focalizzarle per mantenerle confinate all'interno della camera da vuoto.

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

E. O. Lawrence (1930) ebbe l'idea di curvare le particelle su una traiettoria circolare, facendole ripassare molte volte nello stesso sistema accelerante

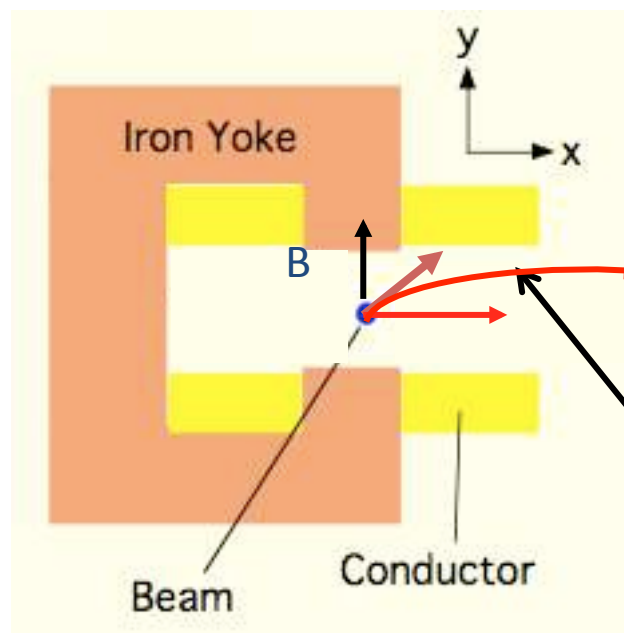
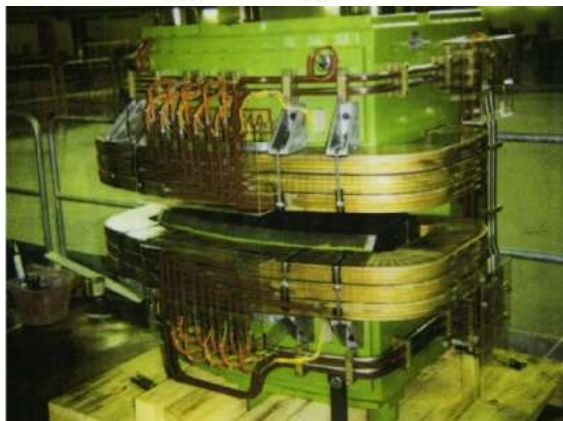
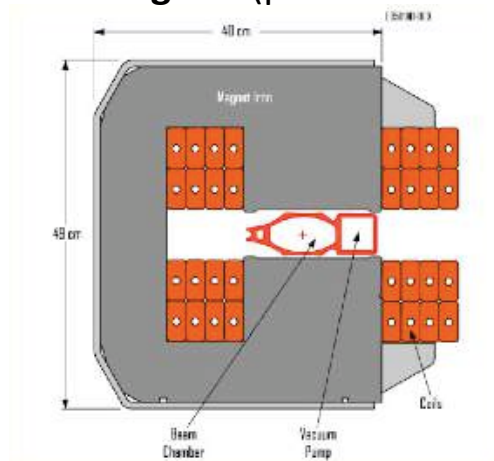


Particelle che viaggiano in un **acceleratore lineare** attraversano una sola volta la struttura accelerante mentre in un acceleratore **circolare** attraversano più volte la stessa cavità.

Ad ogni giro tali pacchetti acquistano energia grazie al campo elettrico accelerante (a radiofrequenza)

DIPOLI: DEFLESSIONE

Consentono di curvare la traiettoria delle particelle. Possono essere realizzati con **magneti permanenti** o **elettromagneti** (poli ferro con avvolgimenti percorsi da corrente).

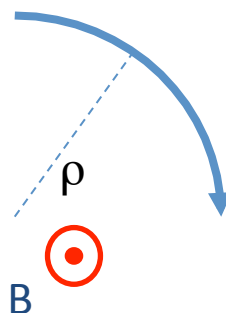


Traiettoria circolare

Raggio di curvatura

$$\rho[m] = \frac{p}{Bq} \cong \frac{W}{cqB}$$

Per particelle
ultra-relativistiche

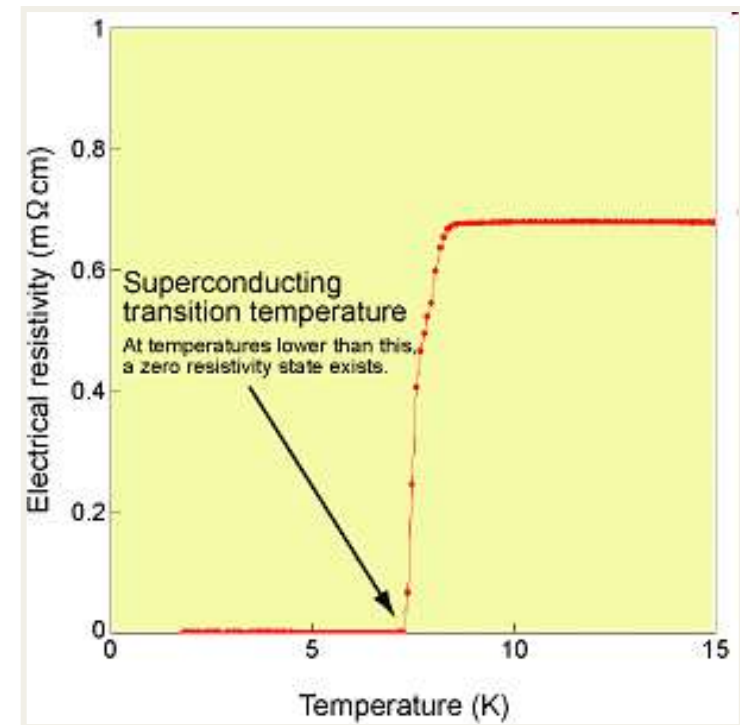


I dipoli elettromagnetici vengono usati per produrre B non oltre 1-2 T.
Per campi magnetici più intensi si ricorre a ***magneti superconduttori***

MATERIALI SUPERCONDUTTORI

I *materiali superconduttori* al di sotto di una certa temperatura (dell'ordine di qualche Kelvin) offrono una **resistenza trascurabile** al passaggio della corrente.

Possono essere usati per costruire cavità o magneti con generare B fino a 10 T

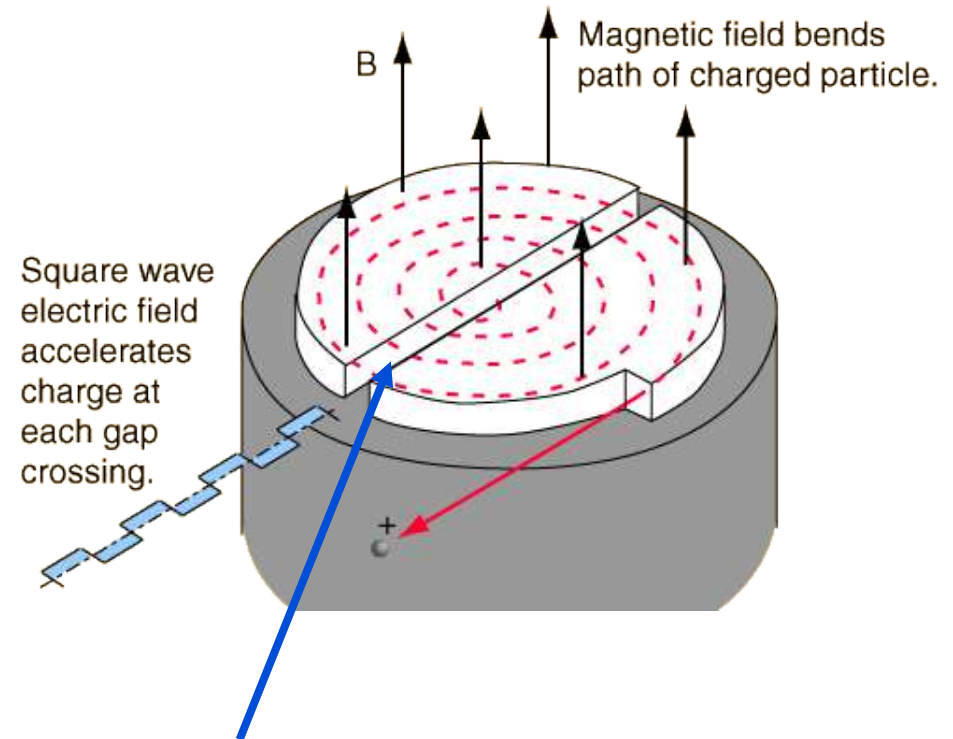
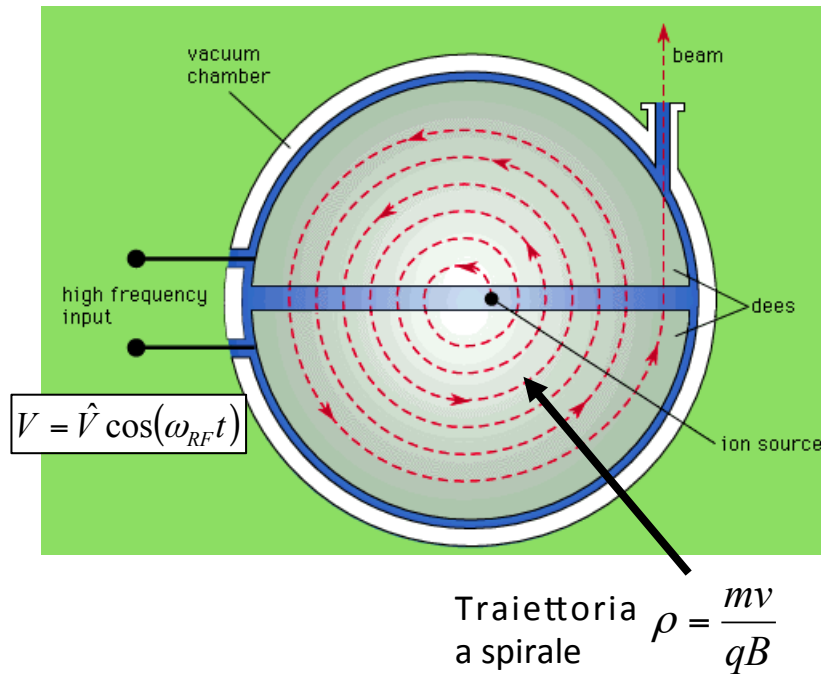


Basse temperature: 2 Kelvin = -271° C

Tali temperature sono ottenute raffreddando i conduttori con un dispositivo frigorifero che usa **He superfluido: il criostato**

Ciclotroni (1/2)

Nei **ciclotroni** l'accelerazione è realizzata tramite un **campo elettrico alternato** tra due o più elettrodi immersi in un **campo magnetico dipolare costante** (E.O.Lawrence-1930)



Ad ogni **passaggio nel gap** tra i due elettrodi le particelle **guadagnano energia**.

$$\Delta W = q \hat{V} \cos \phi$$

Il **sincronismo tra campo accelerante e particelle** si mantiene se è soddisfatta la relazione:

$$f_{RF} = hf_{rev} = h \frac{qB}{2\pi m}$$

I ciclotroni standard hanno una **f_{RF} costante** e, quindi, tale sincronismo è mantenuto perfettamente solo nel caso di **particelle non relativistiche** ($m=m_0=\text{costante}$)

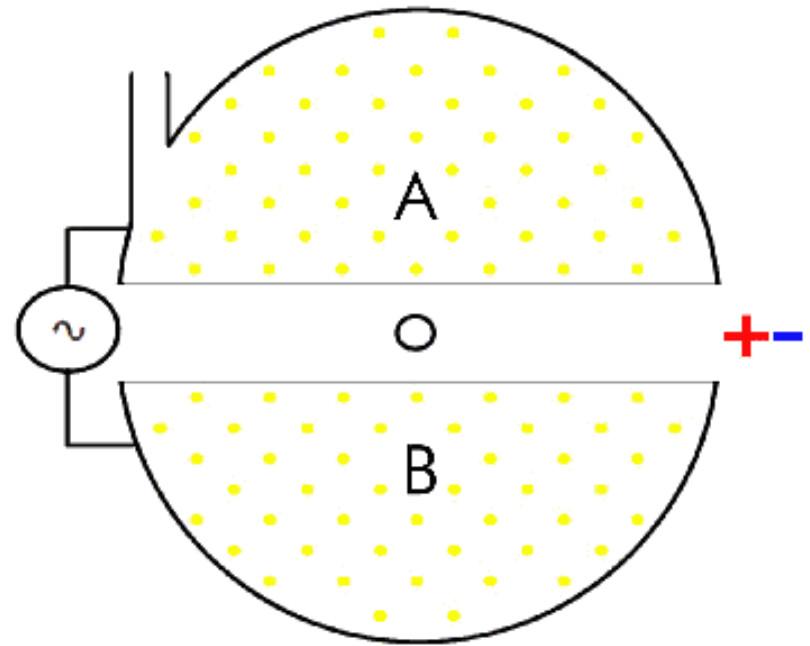
Ciclotroni (2/2)



Il *ciclotrone* è stato progettato con l'intenzione di superare le limitazioni dell'acceleratore lineare. All'epoca (1930) non era possibile generare onde radio contemporaneamente ad alta frequenza ed alta potenza, per cui gli stadi di accelerazione lineare (DTL) dovevano essere spazati tra loro ed erano necessari più stadi (per compensare la limitata potenza). **Per ottenere energie elevate era necessario costruire acceleratori lunghi** e, oltre un certo limite, troppo costosi.

Poiché il ciclotrone accelera le particelle su un percorso circolare, è possibile ottenere lunghi percorsi in poco spazio e può essere alimentato con un **unico e relativamente economico sistema elettronico**.

Nonostante i significativi miglioramenti raggiunti nel tempo, la struttura del dispositivo ne limita la convenienza economica per potenze molto elevate. Il problema principale è che per ottenere energie elevate è necessario **incrementare il diametro della camera a vuoto e del magnete** e dell'intensità del campo prodotto da questo. Trova comunque moltissime applicazioni nella prima **accelerazione di ioni**.



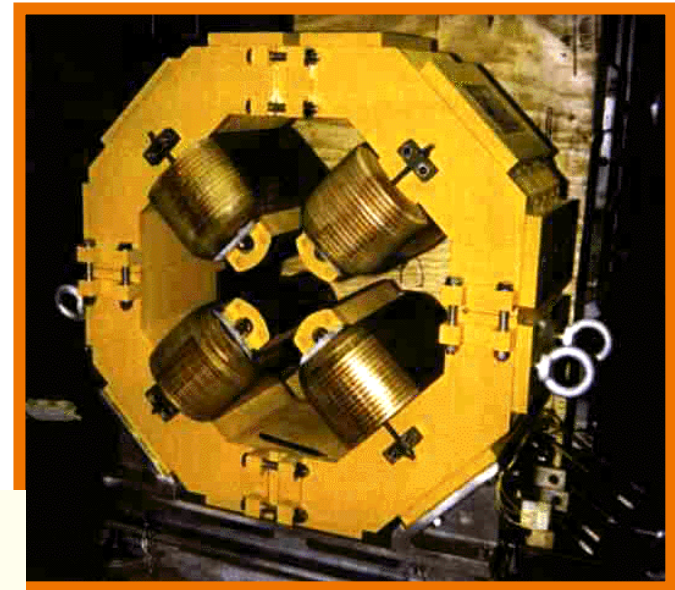
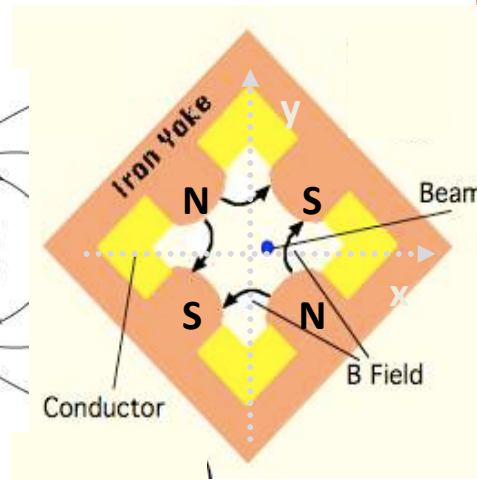
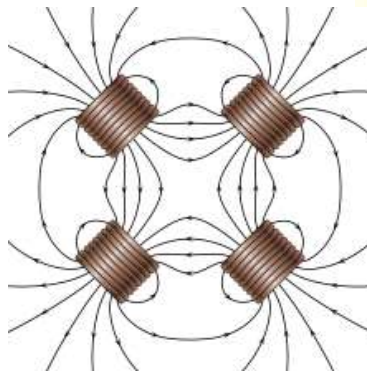
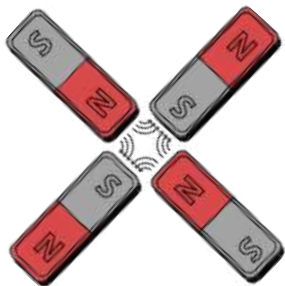
<https://youtu.be/cutKuFxeXmQ>

QUADRUPOLO: FOCHEGGIAMENTO

E' un magnete con **4 poli** che **focheggia le traiettorie delle singole particelle** così come fa una lente con la luce.

Caratteristiche di B

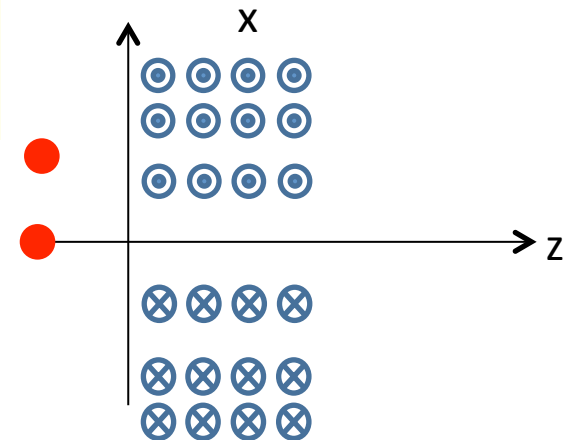
- $B=0$ al centro
- L'intensità di **B cresce linearmente** ed in maniera proporzionale allo spostamento rispetto all'asse di riferimento



$$B_x = g \cdot y$$

$$B_y = g \cdot x$$

$$g = \left[\frac{T}{m} \right]$$

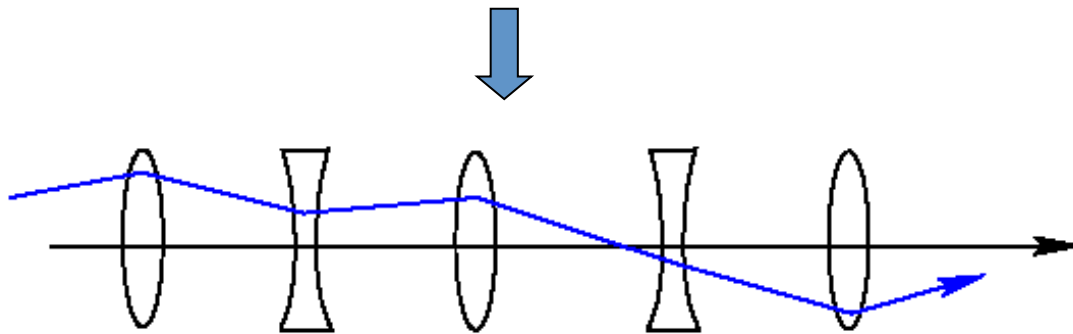


FOCHEGGIAMENTO TRASVERSO: FUNZIONE β

Un *quadrupolo* *focchetta* il fascio in un piano e lo *defocchetta* nell'altro.

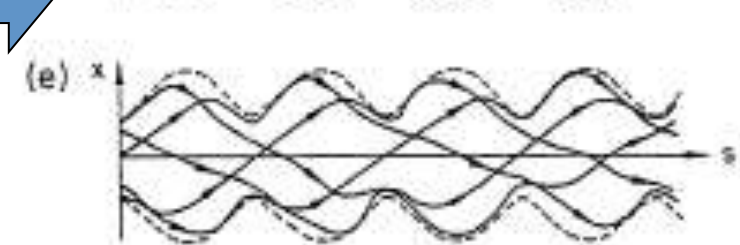
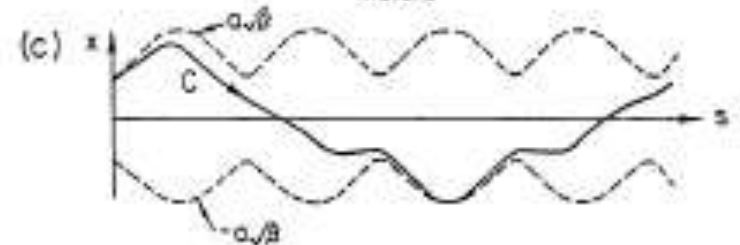
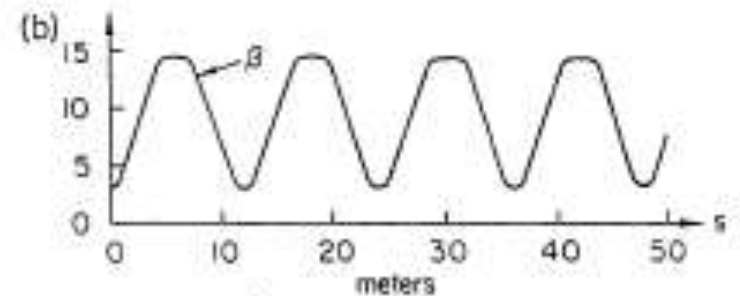
Per ottenere il **foccheggio complessivo** di un fascio di particelle lungo un canale di trasporto o in un acceleratore circolare bisogna usare una **sequenza di quadrupoli con il segno alternato**

Tale configurazione è in grado di garantire traiettorie stabili.



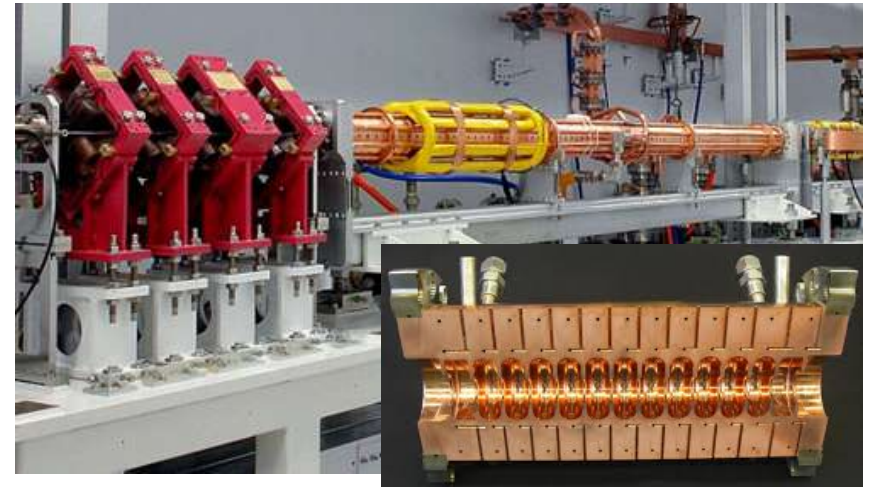
La **traiettoria trasversa descritta da ogni particella** è una pseudo-sinusoide.

L'inviluppo all'interno del quale sono confinate tutte le particelle del pacchetto è detto **funzione β** .



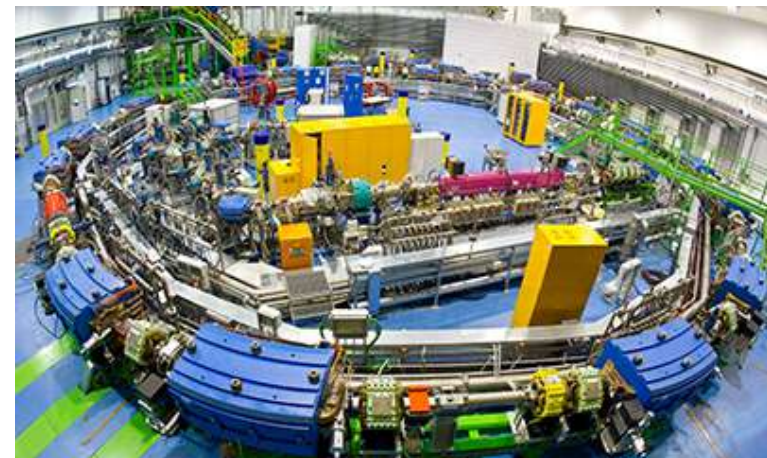
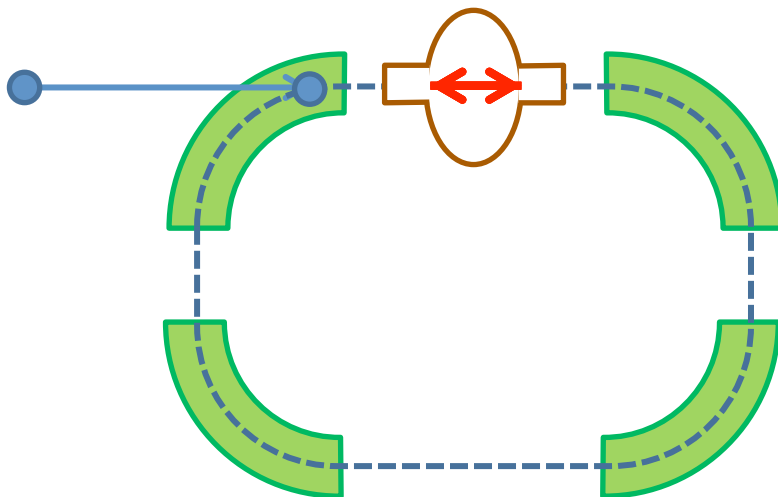
ACCELERATORI LINEARI E SINCROTRONI

Un acceleratore lineare (**LINAC**) si presenta tipicamente come una **sequenza alternata di sezioni acceleranti, quadrupoli, elementi di diagnostica** che consentono di misurare la posizione delle particelle all'interno della camera da vuoto.



m → km

Con l'utilizzo di **dipoli** il fascio può anche essere fatto circolare all'interno di un **anello** in cui si ha un'unica cavità acceleratrice. Ad ogni passaggio il fascio di particelle acquista energia. Queste macchine sono dette **sincrotroni**.

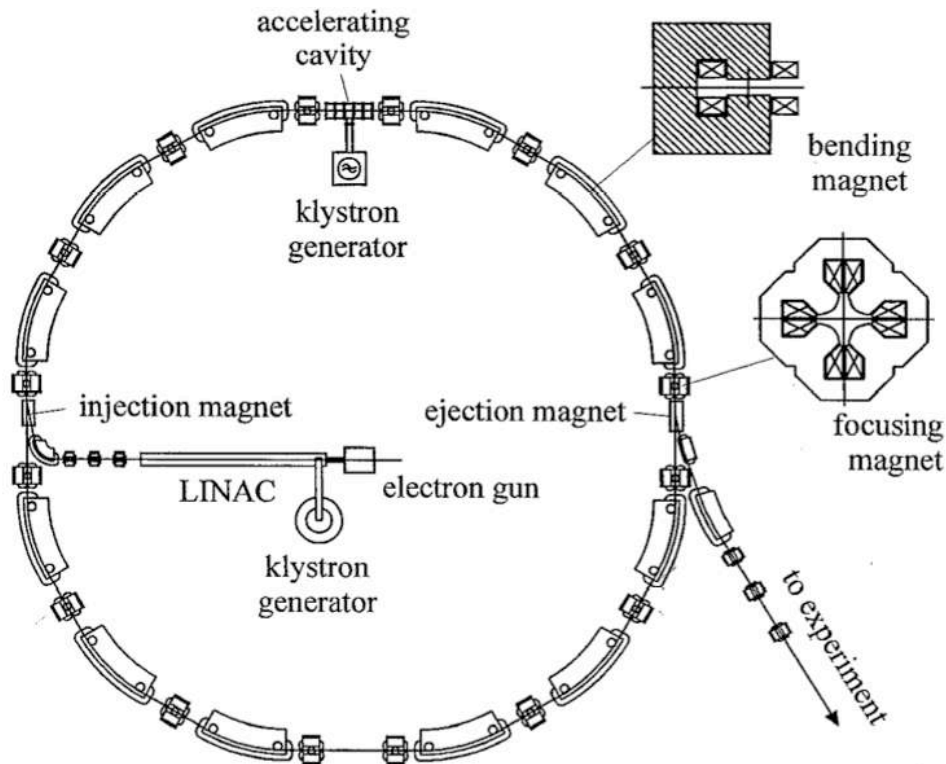


ACCELERATORI CIRCOLARI: IL SINCROTRONE

Il *sincrotrone* è un acceleratore di particelle circolare.

A differenza del LINAC, nel sincrotrone, **le particelle descrivono orbite chiuse** grazie all'utilizzo di magneti curvati (**dipoli**) che deflettono le particelle. Il **campo elettrico è sincronizzato con il fascio** delle particelle in modo che ad ogni passaggio successivo in cavità queste aumentano la loro energia.

B aumenta in modo da tenere il raggio dell'orbita costante (Il valore di **B** non è illimitato quindi per raggiungere alte energie è necessario costruire acceleratori con un raggio molto grande).



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

CAVITA' RF- accelera il fascio

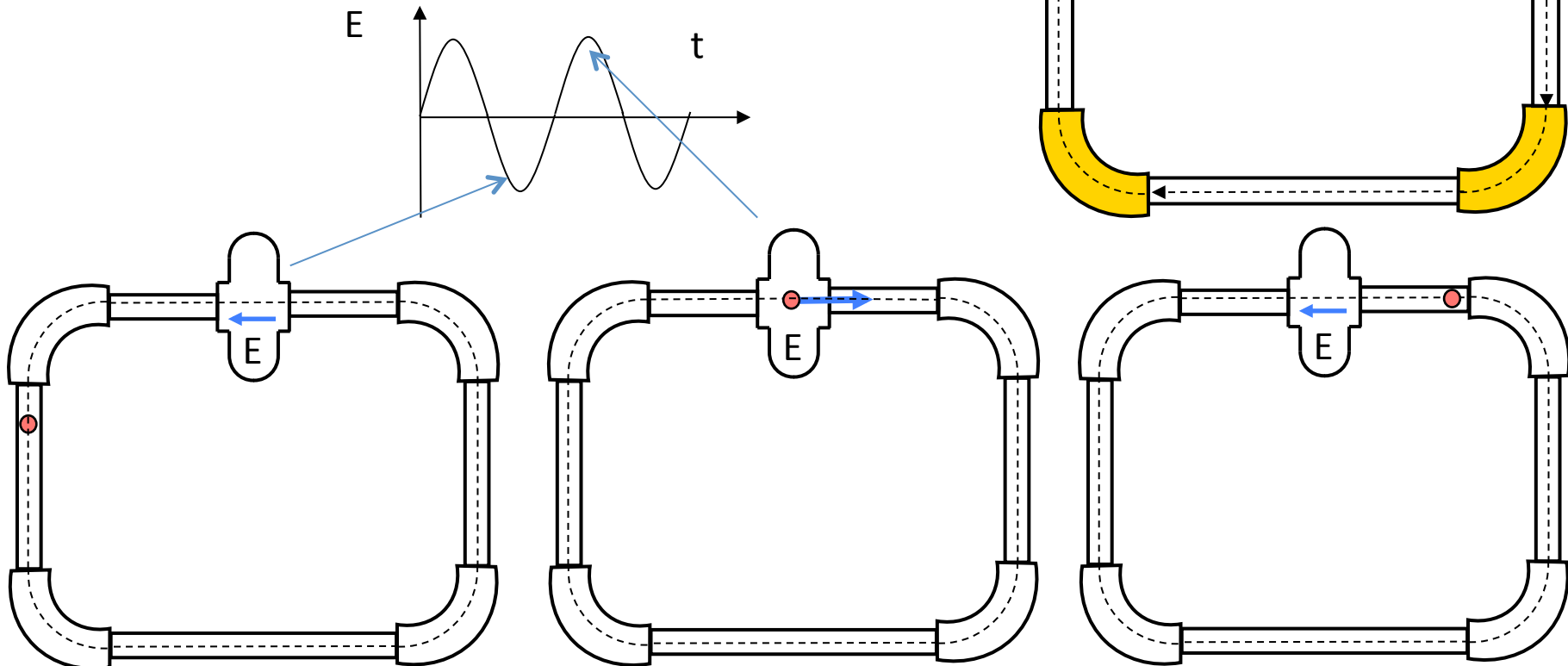
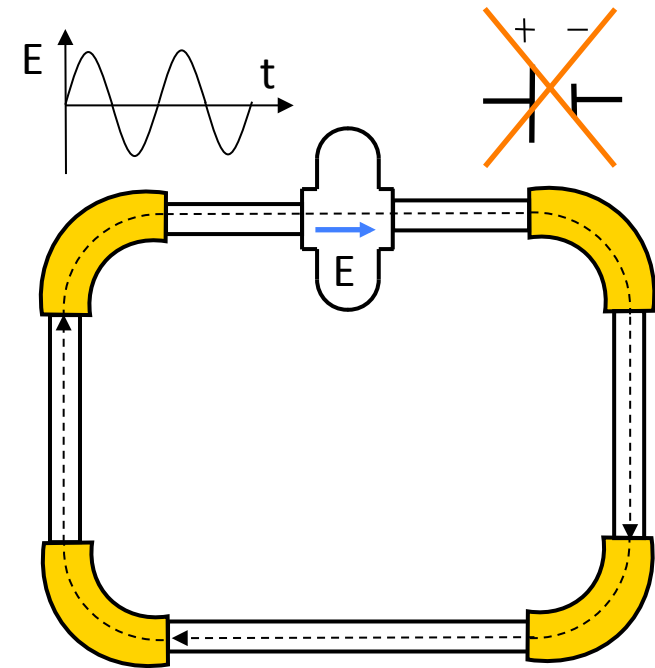
CAMERA DA VUOTO

DIAGNOSTICA

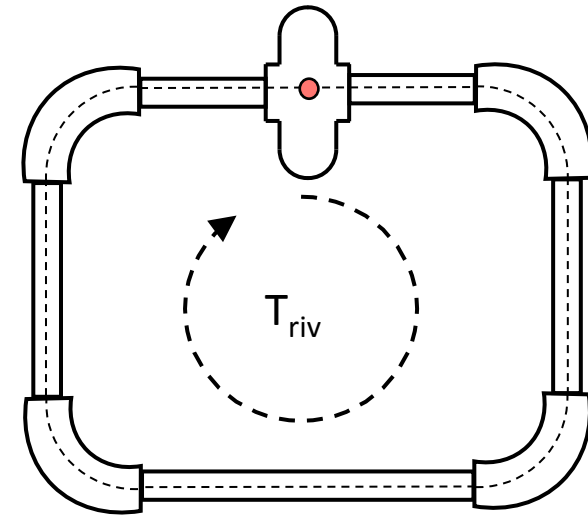
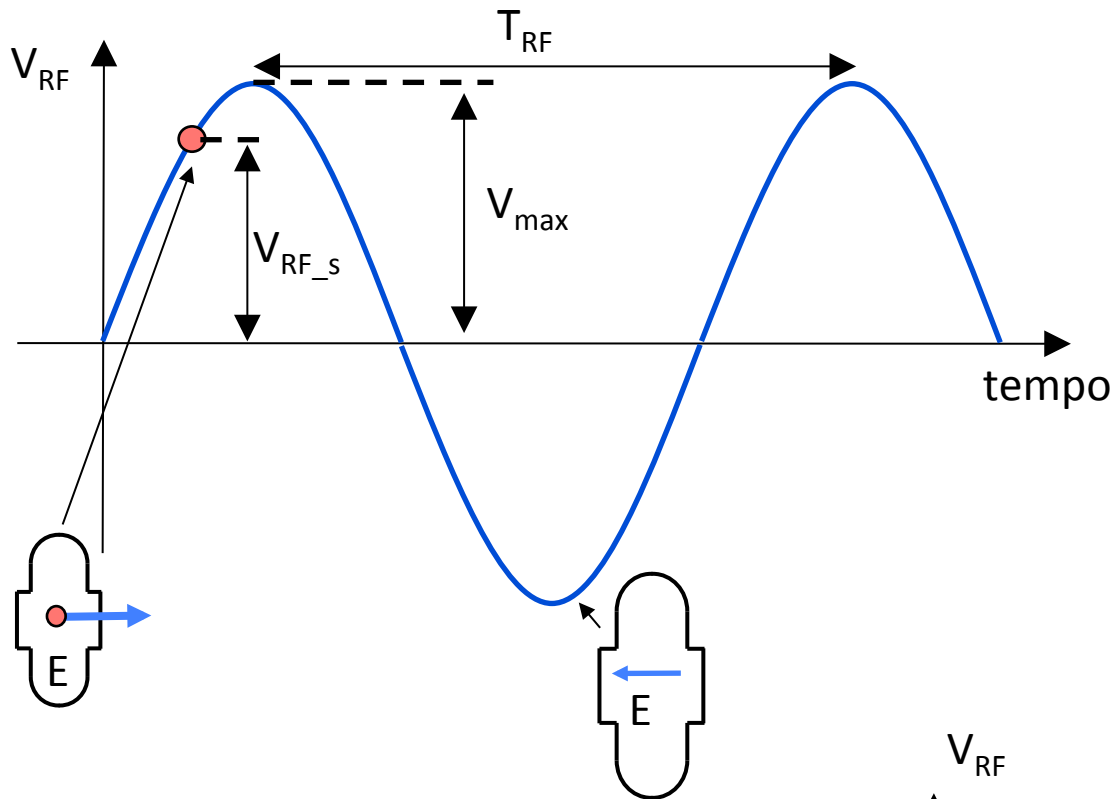


Accelerazione in un sincrotrone

Il **campo elettrico** in cavità accelera le particelle e **non può essere elettrostatico** ma deve avere necessariamente **carattere oscillatorio** nel tempo altrimenti in un giro completo una particella guadagnerebbe energia nella cavità e la perderebbe nella rimanente parte dell'acceleratore-principio di (conservatività del campo elettrostatico).



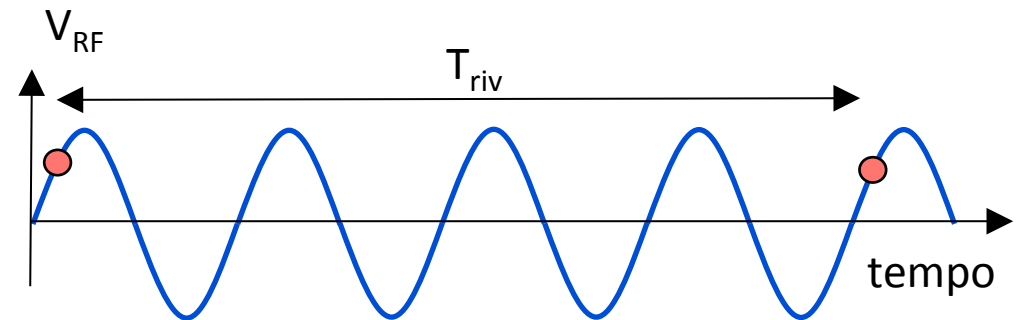
Periodo di rivoluzione e numero armonico



Il tempo impiegato dalla particella a descrivere un giro completo è detto **periodo di rivoluzione** (T_{riv})

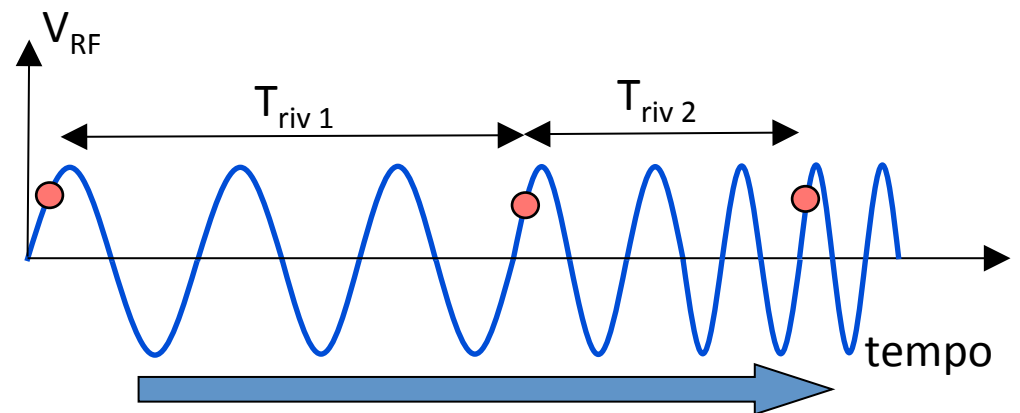
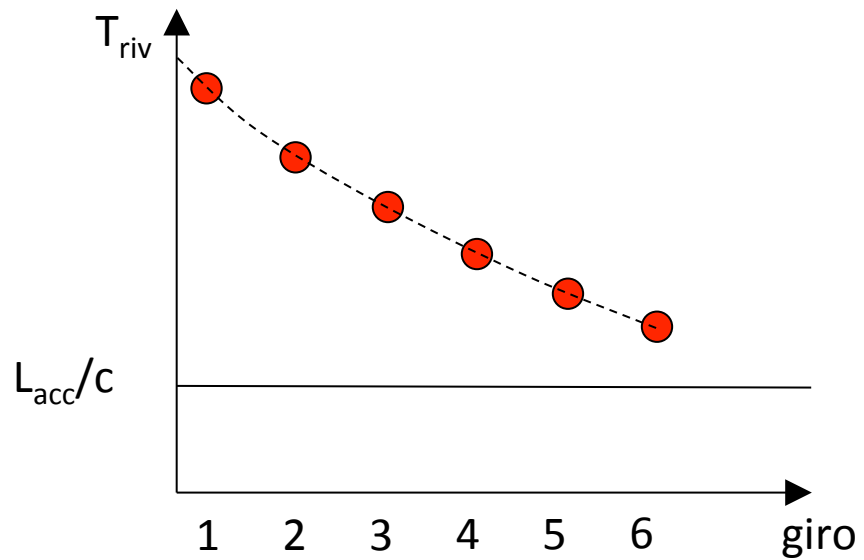
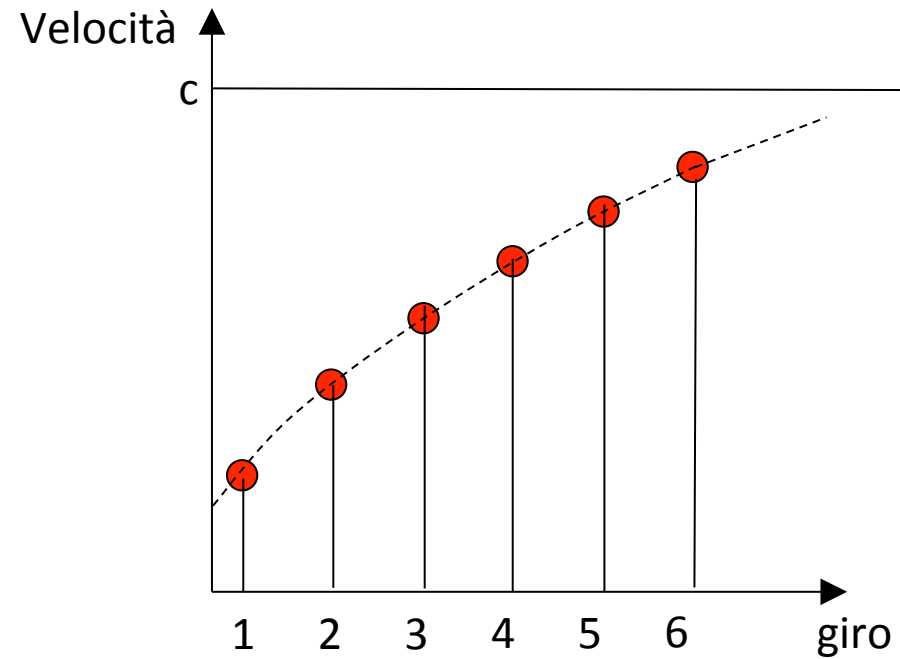
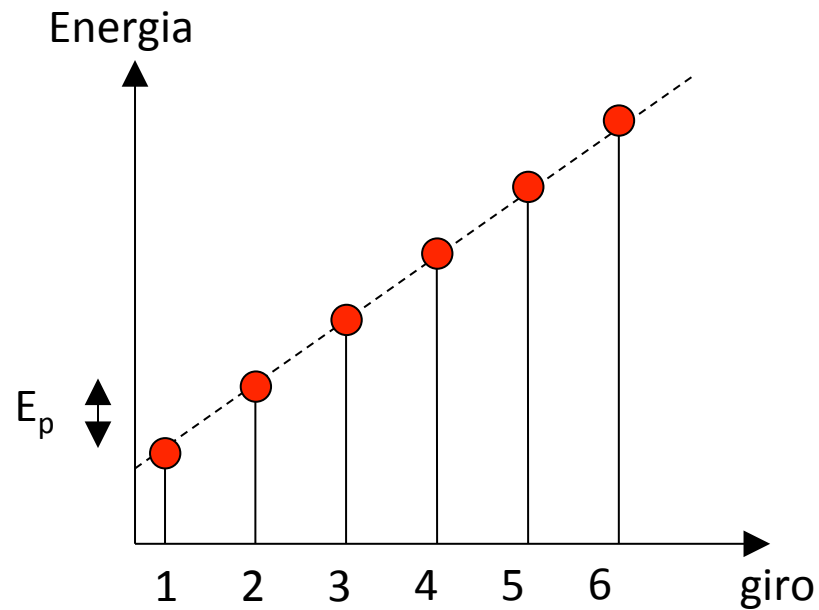
Per avere accelerazione “stabile” ovvero per fare in modo che la particella dopo un giro veda sempre la stessa tensione accelerante in cavità, il periodo di rivoluzione (T_{riv}) deve essere un multiplo intero (h) del periodo di radiofrequenza (T_{RF}) ad ogni giro.

h è detto **numero armonico** ed è pari al numero di “pacchetti” di particelle che può essere accelerato stabilmente nel sincrotrone.



$$T_{riv} = hT_{RF}$$

Accelerazione-energia-velocità



Durante l'accelerazione la **frequenza RF aumenta** per mantenere il sincronismo tra particella e campo accelerante: **sistema RF complesso**

LORENTZ FORCE: ACCELERATION AND FOCUSING

Particles are accelerated through electric field and are bended and focalized through magnetic field.
The basic equation that describe the acceleration/bending /focusing processes is the **Lorentz Force**.

$\vec{p}$ = momentum

m = mass

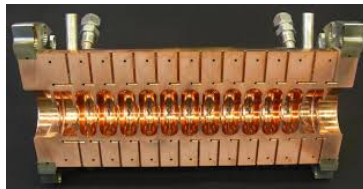
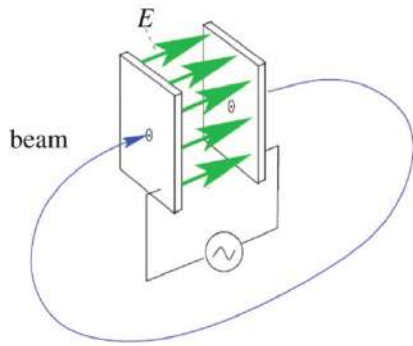
$\vec{v}$ = velocity

q = charge

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

ACCELERATION

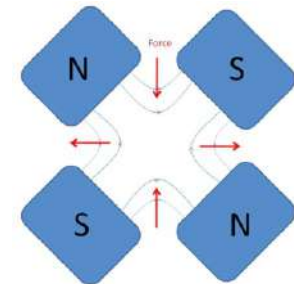
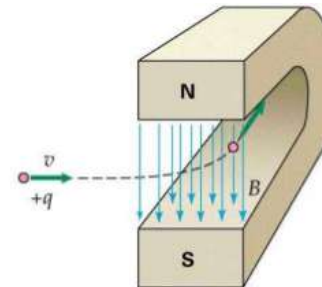
To accelerate, we need a force in the direction of motion



Longitudinal Dynamics

BENDING AND FOCUSING

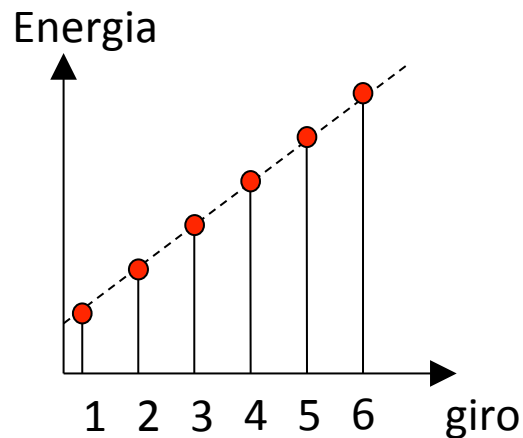
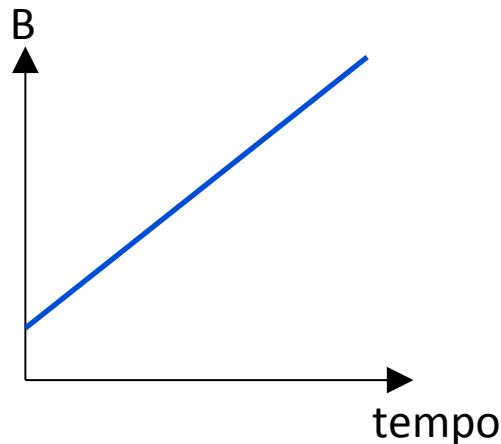
2nd term always perpendicular to motion => no energy gain



Transverse Dynamics

Campo magnetico

All'aumento di energia giro per giro deve corrispondere un **aumento dell'intensità del campo magnetico** dei dipoli (B) in modo tale da mantenere le particelle sempre sulla stessa orbita.



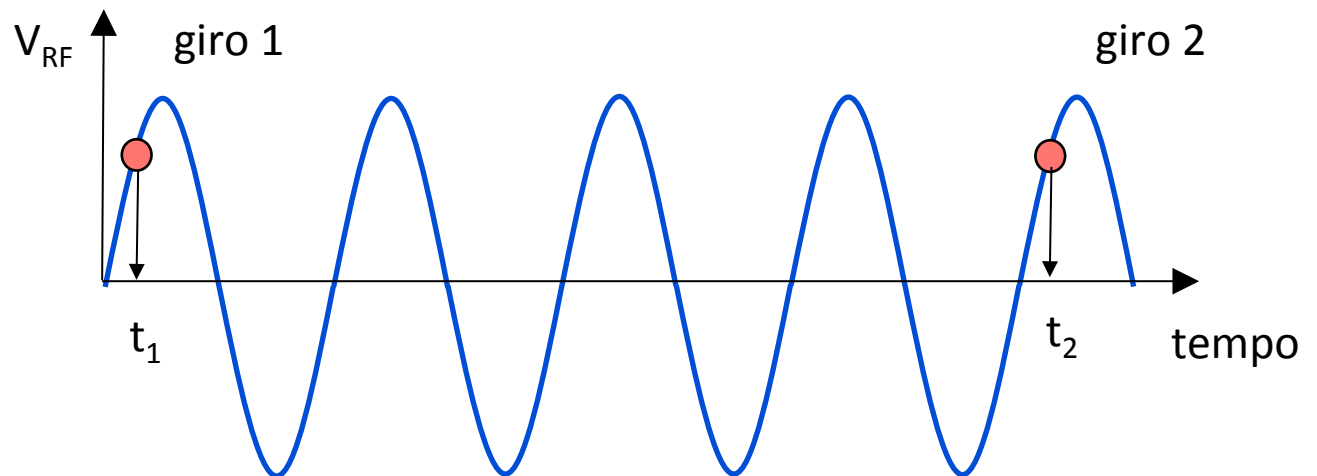
$$R \propto \frac{E_{particella}}{B}$$

Raggio di curvatura

Particella sincrona

La **particella sincrona** è quella particella che ad ogni giro:

- 1) ha l'energia nominale che le consente di descrivere sempre la stessa orbita di riferimento;
- 2) guadagna, passando attraverso la cavità RF, sempre la stessa quantità di energia E_p
- 3) entra in cavità sempre con la stessa fase rispetto alla tensione accelerante (**fase sincrona**) e vede sempre la stessa tensione accelerante.



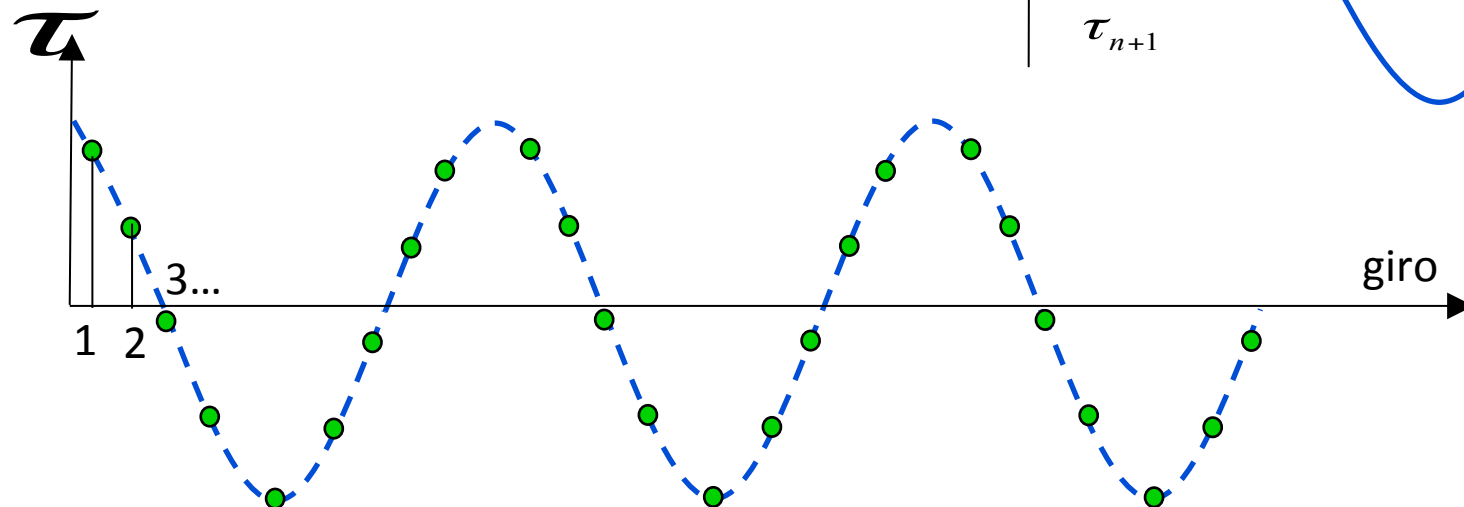
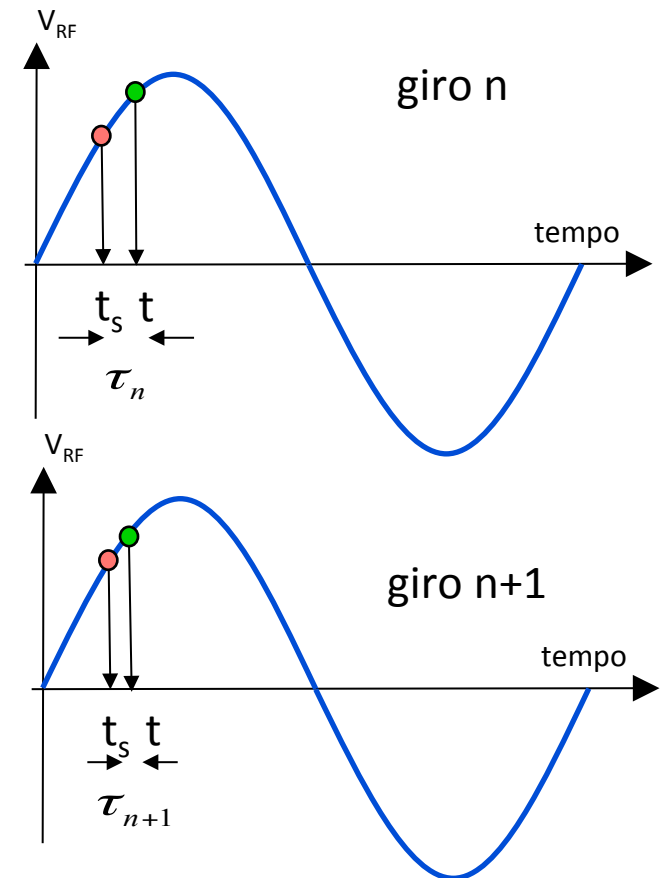
OSCILLAZIONI DI SINCROTRONE

Consideriamo una particella **NON sincrona** che entra in cavità in ritardo rispetto a quella sincrona.

La **tensione accelerante vista dalla particella è maggiore** di quella vista dalla particella sincrona.

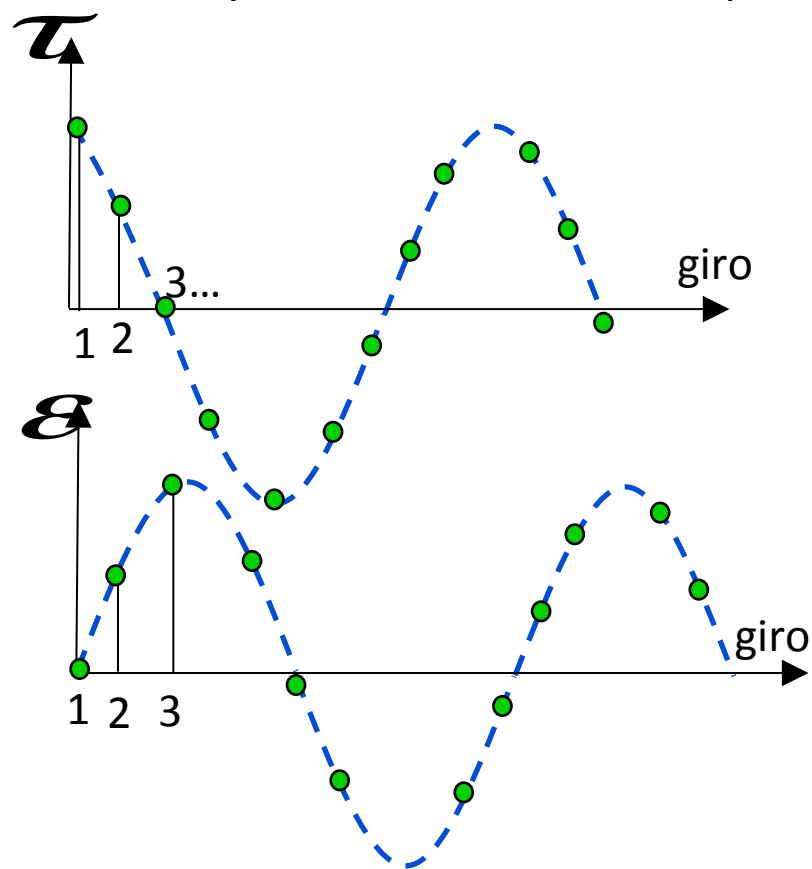
A questa maggiore accelerazione corrisponde un aumento di velocità e, quindi, al giro successivo la particella NON sincrona avrà **recuperato parte del suo "svantaggio"** rispetto a quella sincrona e si troverà più vicina. Viceversa se una particella arriva prima della particella sincrona in cavità vede una tensione in cavità minore e al giro successivo arriverà un po' più in ritardo.

In altre parole **le particelle NON sincrone oscillano stabilmente intorno alla particella (o fase) sincrona** (Principio della stabilità di fase.) Le oscillazioni delle particelle non sincrone intorno alla fase sincrona vengono dette **OSCILLAZIONI DI SINCROTRONE**. La corrispondente frequenza viene detta **FREQUENZA DI SINCROTRONE**



Oscillazioni di sincrotrone

Si può dimostrare che **le particelle NON sincrone oscillano** stabilmente intorno alla particella (o fase) sincrona (Principio della stabilità di fase) Le oscillazioni delle particelle non sincrone intorno alla fase sincrona vengono dette **Oscillazioni di sincrotrone**. La corrispondente frequenza viene detta **frequenza di Sincrotrone**. **La tensione RF esercita una forza di richiamo sulle particelle non sincrone simile a quella di una molla.**

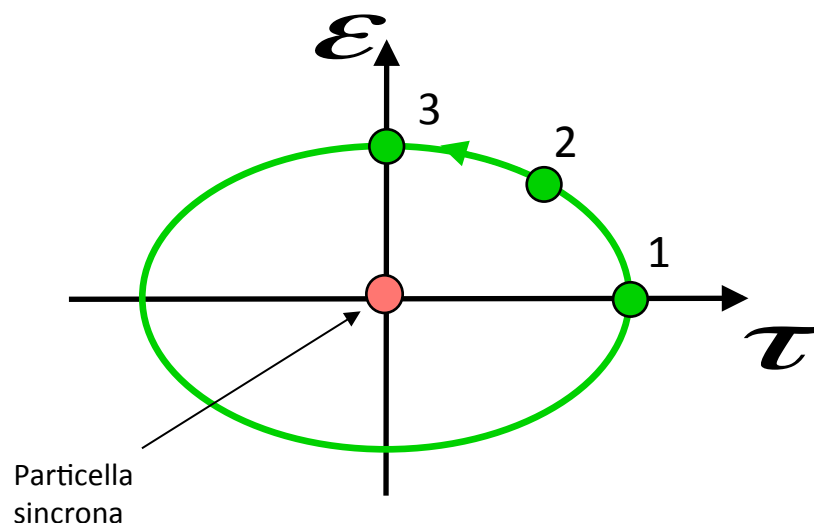


Tempo di arrivo in
cavità della
particella NON
sincrona al giro n

Tempo di arrivo in
cavità della particella
sincrona al giro n

$$t - t_s = \tau$$

Differenza tra i
due tempi di
arrivo al giro n



Nel piano (τ, ϵ) detto **spazio delle fasi longitudinale** una particella non sincrona descrive una ellisse che viene percorsa con una frequenza pari proprio alla frequenza di sincrotrone. Frequenze di sincrotrone tipiche sono dell'ordine della decina di kHz.

Energia della
particella NON
sincrona al giro n

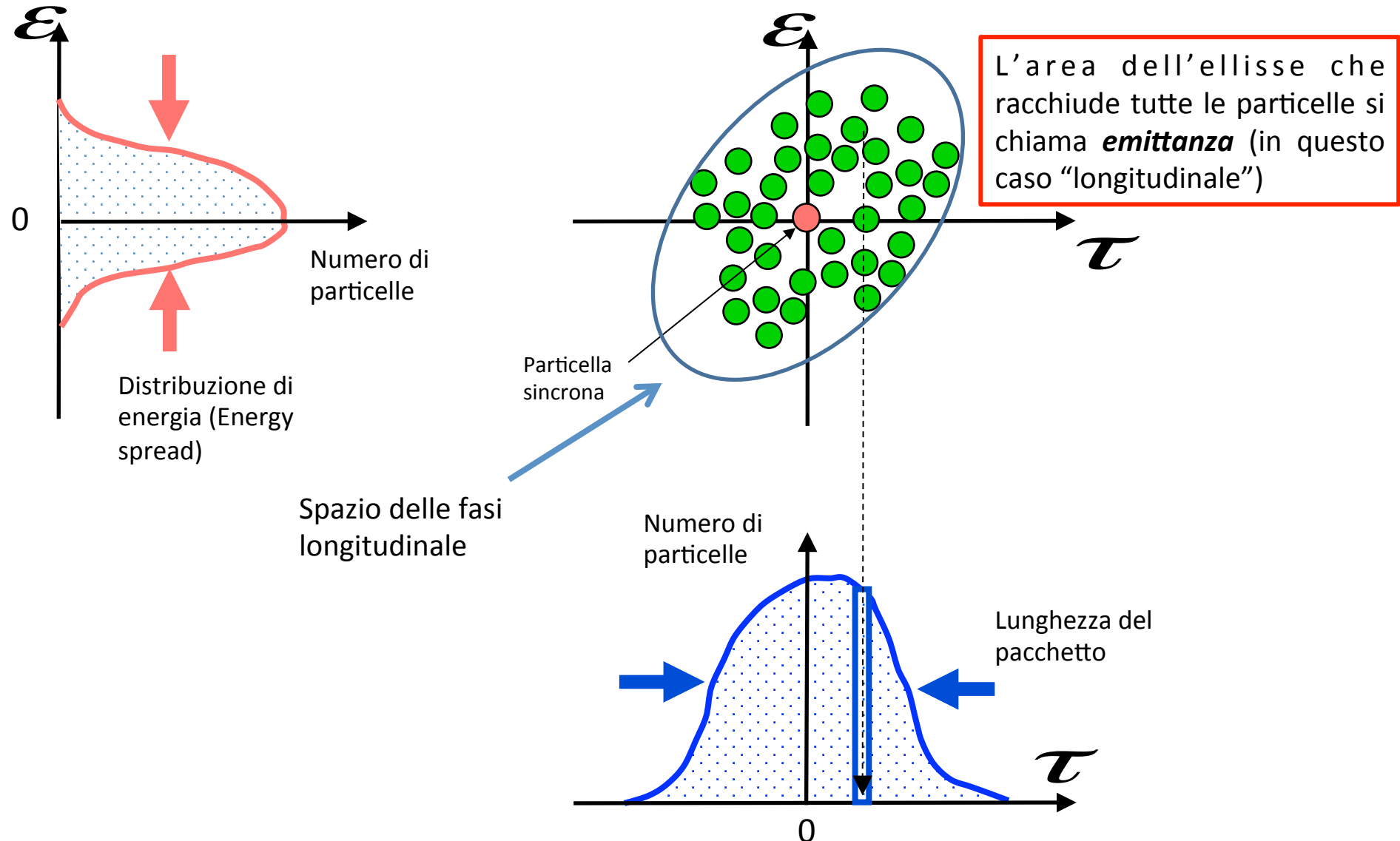
Energia della
particella sincrona
al giro n

Differenza tra le
due energie al
giro n

$$E - E_s = \epsilon$$

Lunghezza del pacchetto di particelle e distribuzione di energia

In un certo istante le ***N particelle*** che compongono il pacchetto sono ***distribuite intorno alla particella sincrona*** e oscillano intorno a questa stabilmente e con la stessa frequenza ***descrivendo delle ellissi*** di area diversa nello spazio delle fasi.



LORENTZ FORCE: ACCELERATION AND FOCUSING

Particles are accelerated through electric field and are bended and focalized through magnetic field. The basic equation that describe the acceleration/bending /focusing processes is the **Lorentz Force**.

$\vec{p}$ = momentum

m = mass

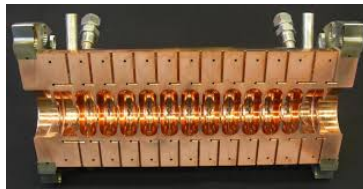
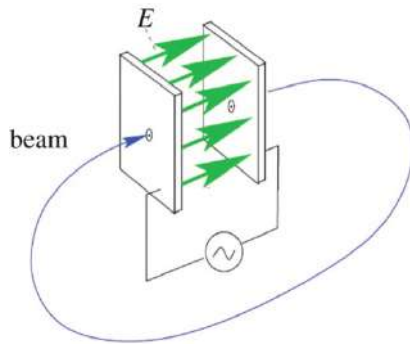
$\vec{v}$ = velocity

q = charge

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

ACCELERATION

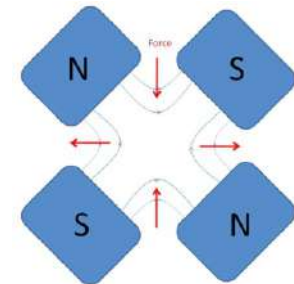
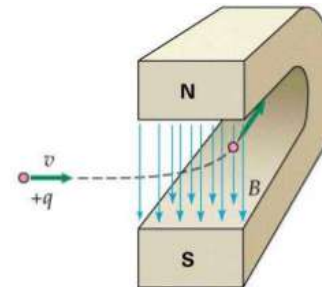
To accelerate, we need a force in the direction of motion



Longitudinal Dynamics

BENDING AND FOCUSING

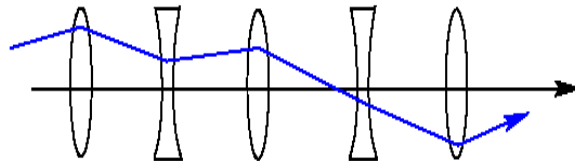
2nd term always perpendicular to motion => no energy gain



Transverse Dynamics

Dinamica trasversa: oscillazioni di betatrone

Analogamente a quello che accade nel piano longitudinale anche nel **piano trasverso le particelle compiono delle oscillazioni** (dette oscillazioni di **betatrone**) causate dalla forza di richiamo esercitata dai quadrupoli. L'oscillazione della singola particella è descrivibile come:

$$x(s) = \sqrt{\beta(s)\epsilon(s)} \cos(\varphi(s) + \varphi_0)$$


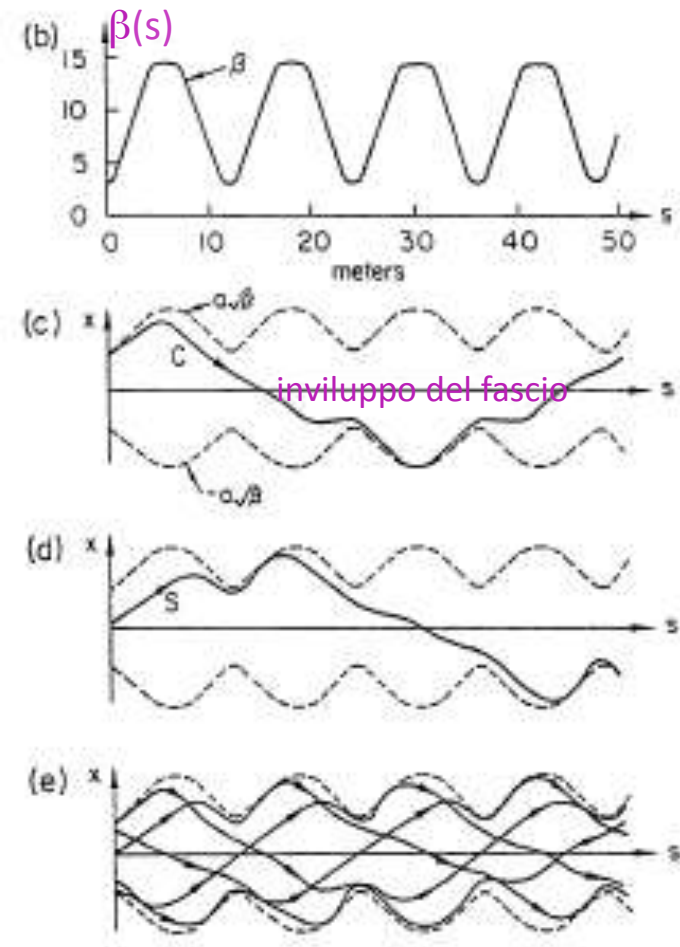
Coordinata curvilinea lungo la macchina

Le oscillazioni di betatrone:

- hanno **ampiezza variabile** lungo s , modulata dalla funzione $\beta(s)$
- la loro **massima ampiezza** definisce **l'involuppo del fascio** di particelle accumulato
- Il numero di oscillazione di betatrone v_x e v_y compiute sul giro descrive globalmente il focheggiamento nell'anello ed è detto "**tuno**" della macchina.

La **funzione β** è:

- sempre positiva
- misurata in metri
- periodica in s ossia riassume gli stessi valori ad ogni giro
- ha un massimo nei QF un minimo nei QD
- descrive globalmente l'effetto dei campi magnetici nell'anello

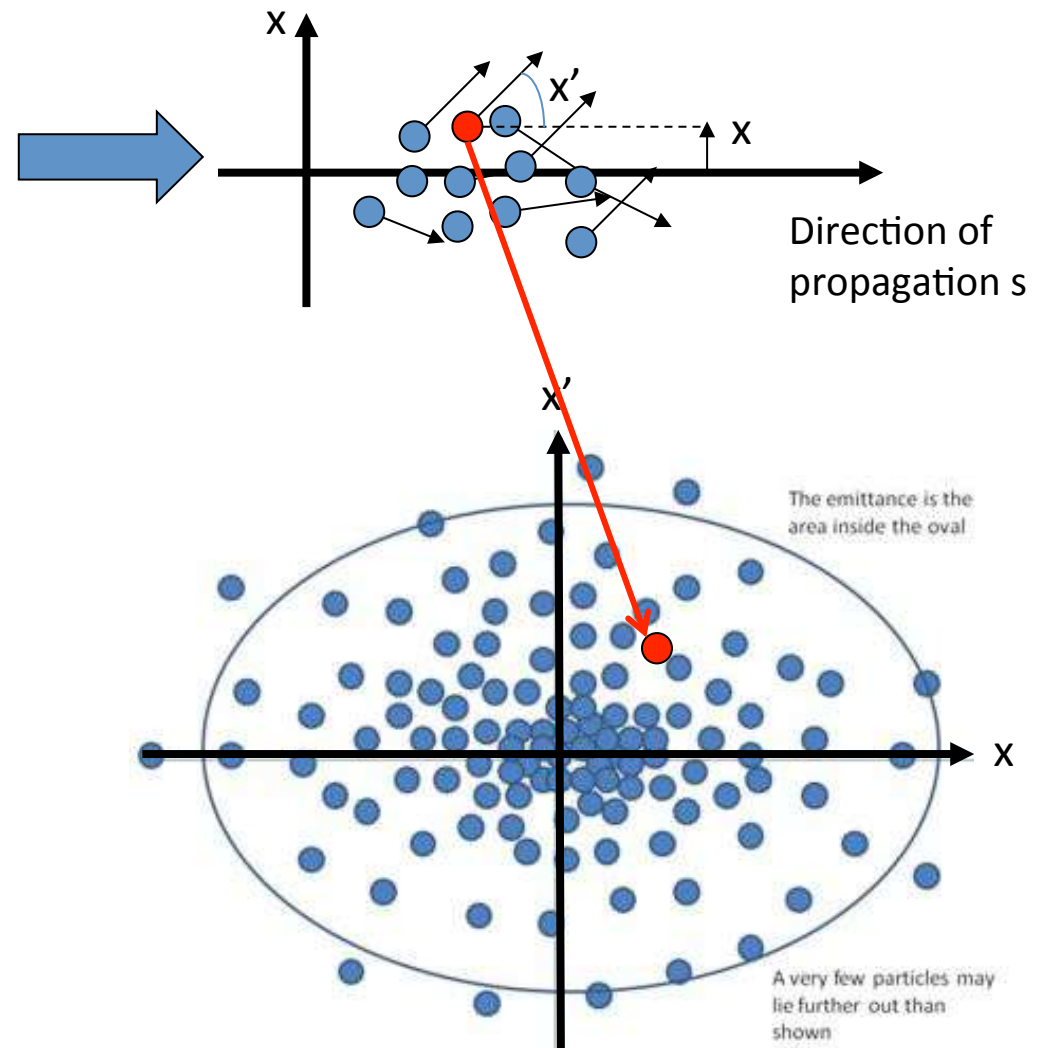
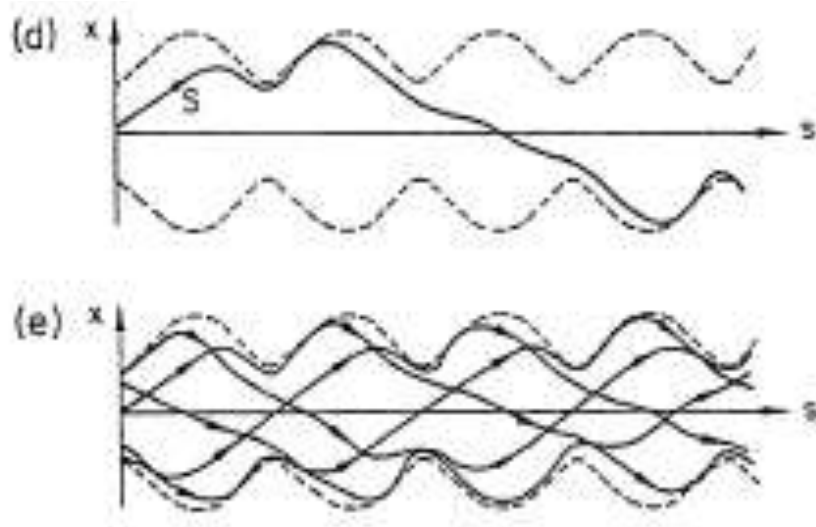


Tutte le traiettorie stabili sono comprese entro l'involuppo

TRANSVERSE PHASE SPACE AND EMITTANCE

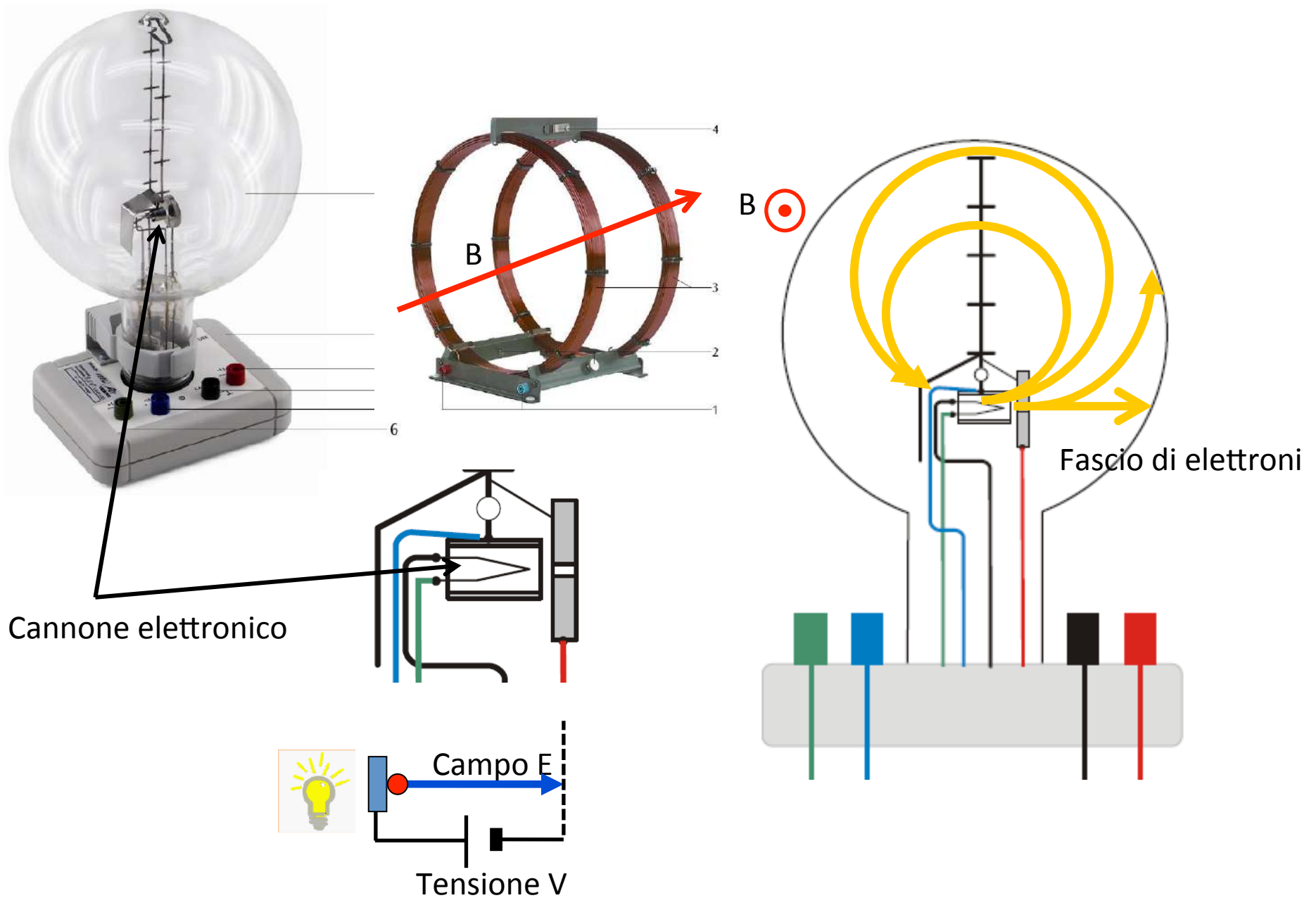
Similarly to what we have in the longitudinal plane also in the transverse plane the particles perform oscillations (called **betatron oscillations**) due to the force provided by quadrupoles.

At a certain point in the machine each particle has a given transverse position and angle with respect to the direction of propagation



The area in the phase space occupied by the bunch is called **transverse emittance**

ESPERIMENTO CON TUBO CATODICO: DESCRIZIONE



ESPERIMENTO CON TUBO CATODICO: CALCOLI

$$\Delta V = 300V$$

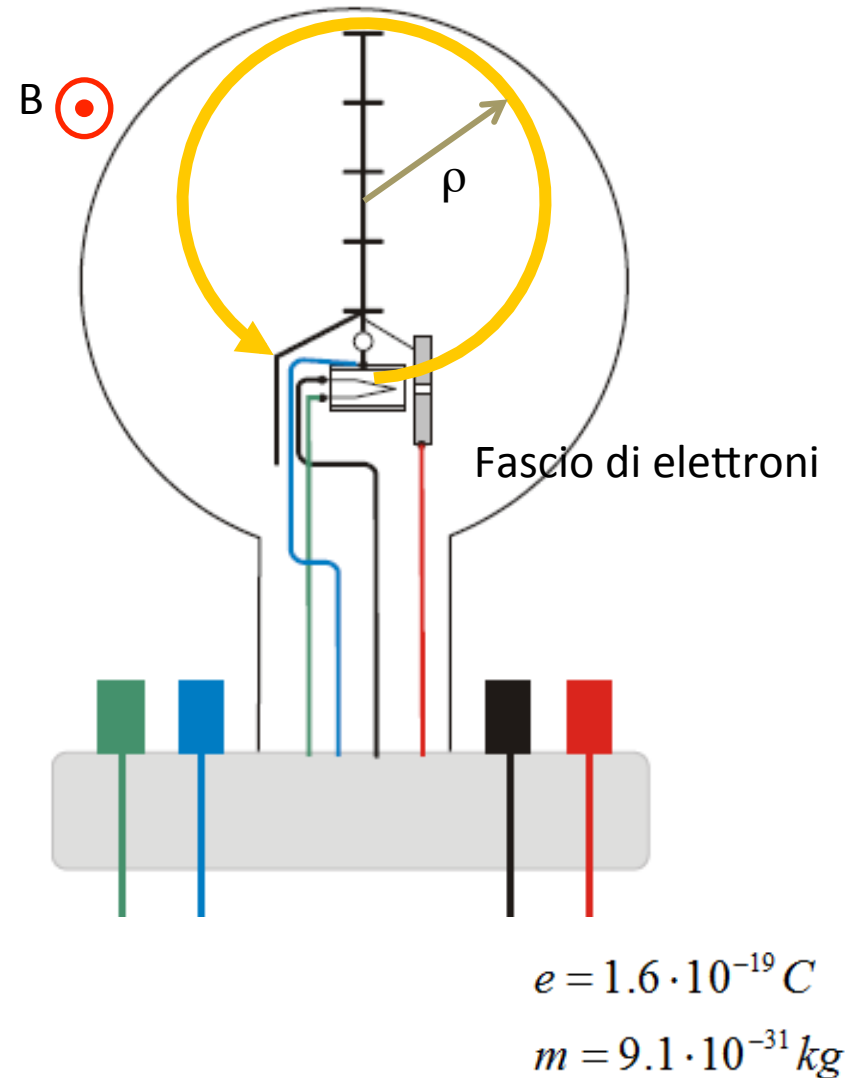
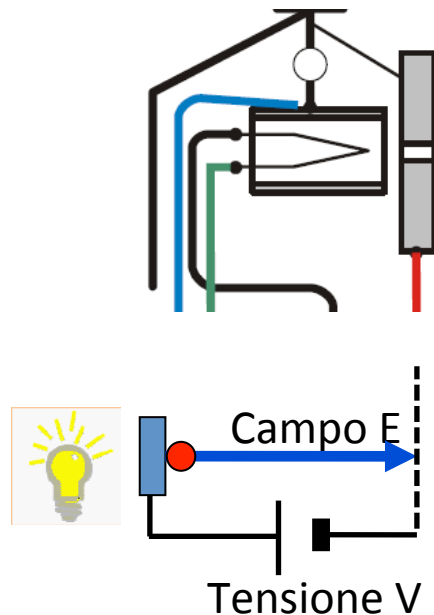
Accelerazione

$$e\Delta V = \frac{1}{2}mv^2 \Rightarrow v = \sqrt{2 \frac{e}{m} \Delta V} \Rightarrow v = 10.27 \cdot 10^6 m/s$$

$$\beta = 0.034$$

Deflessione

$$B = 2 \cdot 10^{-3} T \Rightarrow \rho = \frac{mv}{Be} \cong 3cm$$



IN BREVE: COME SI ACCELERANO LE PARTICELLE

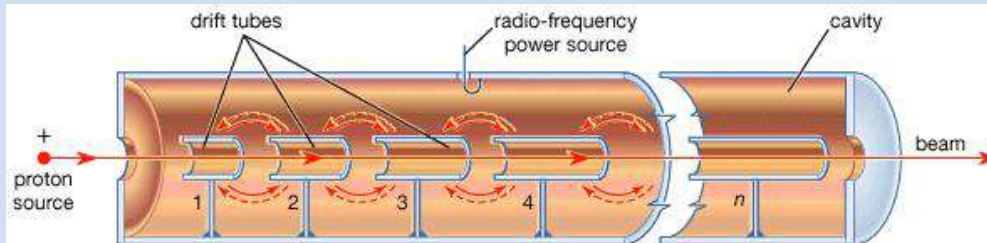
$\vec{p}$ = momentum

$\vec{v}$ = velocity

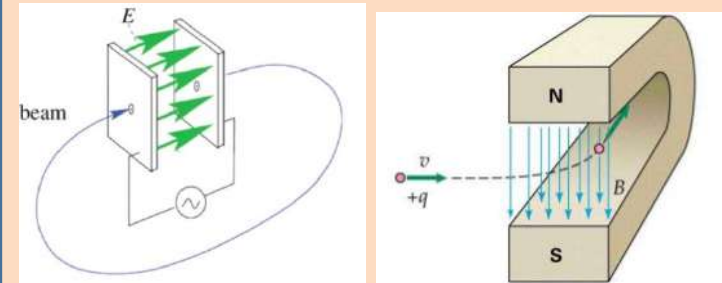
q = charge

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

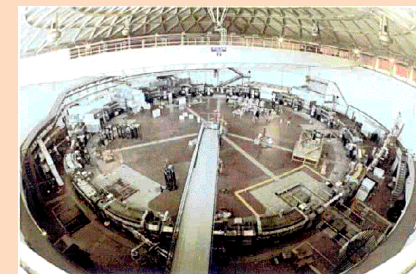
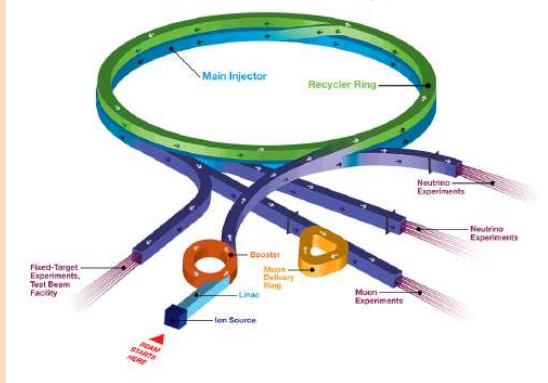
LINEARI



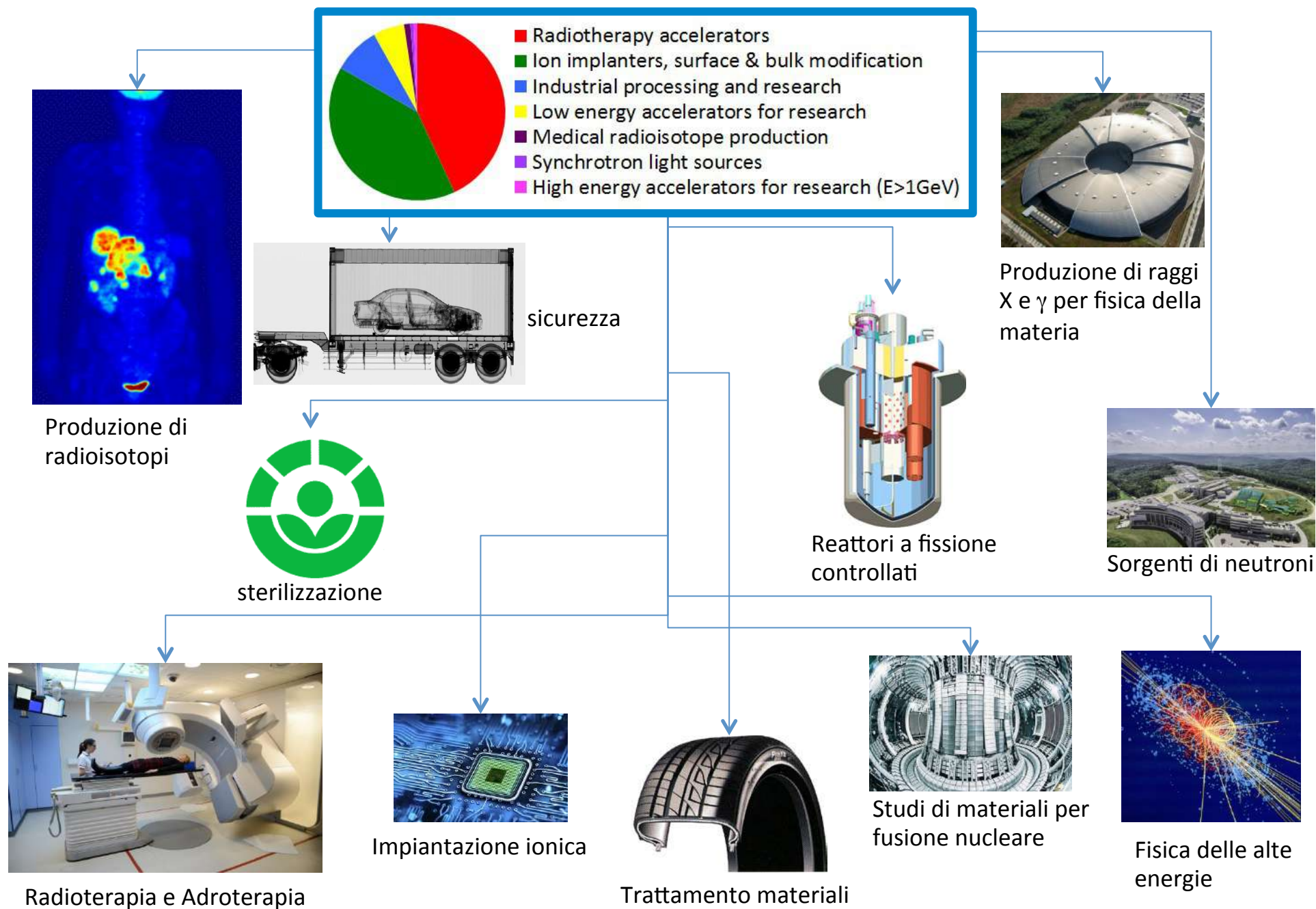
CIRCOLARI



Fermilab Accelerator Complex

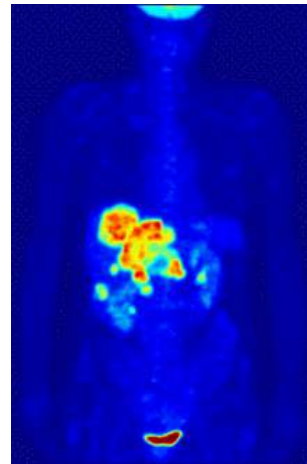
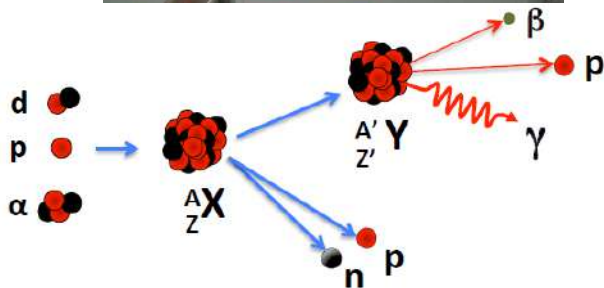


A COSA SERVONO GLI ACCELERATORI DI PARTICELLE?

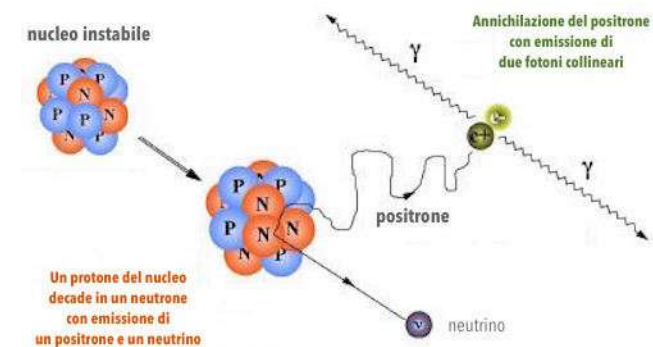
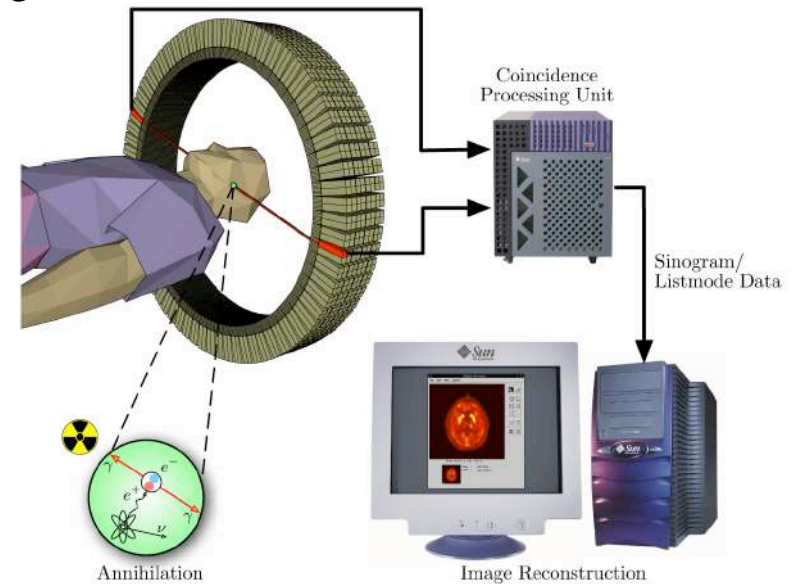


APPLICAZIONI MEDICHE: PRODUZIONE DI RADIOISOTOPI

Produzione di radioisotopi: protoni da 7-100 MeV accelerati con ciclotroni o linac (50 isotopi, utilizzati per diagnostica e trattamento sono prodotti con acceleratori)

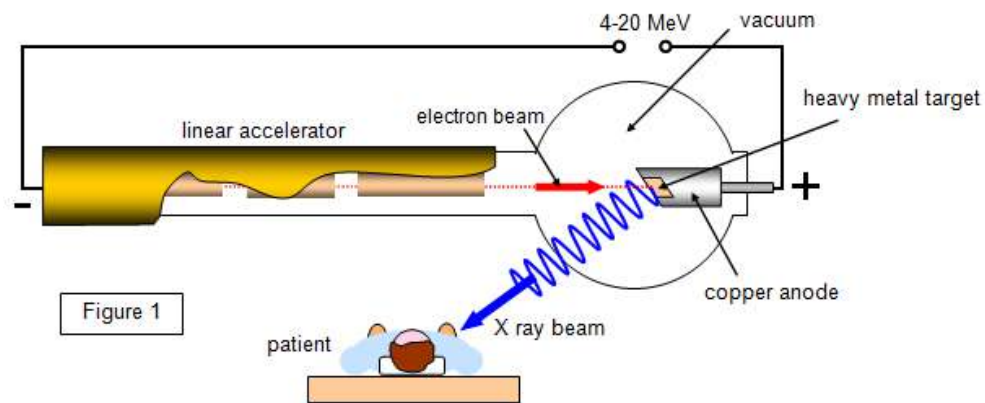


PET: diagnostica medica (oncologica)



APPLICAZIONI MEDICHE: RADIOTERAPIA

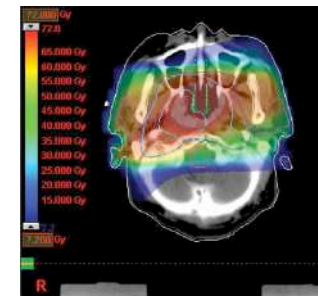
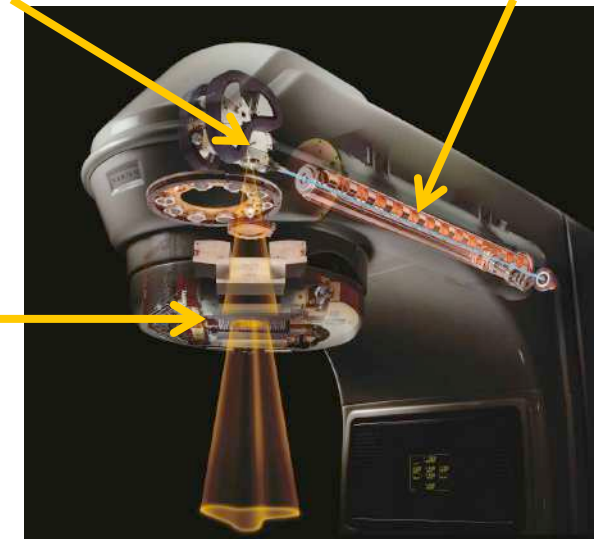
Si irradiano le masse tumorali con fasci di **raggi X** o **elettroni**



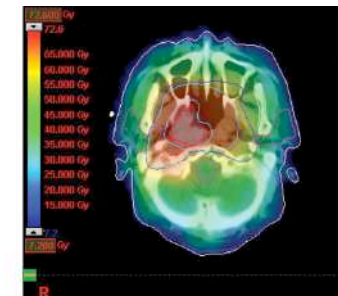
Foglio metallico per la produzione di raggi x

LINAC

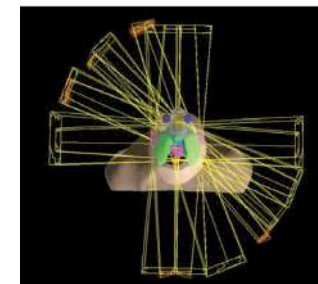
Sistema di collimazione



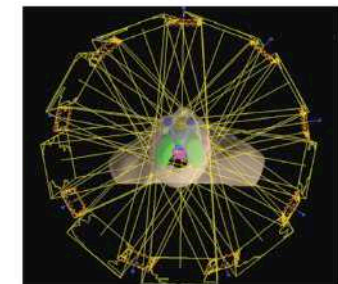
(a)



(b)



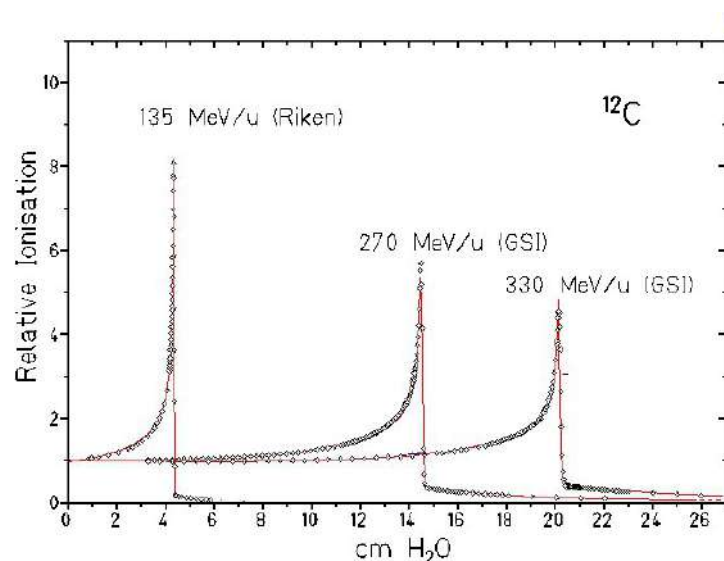
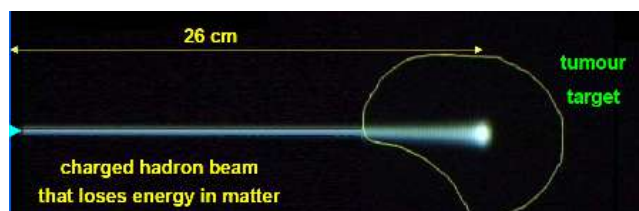
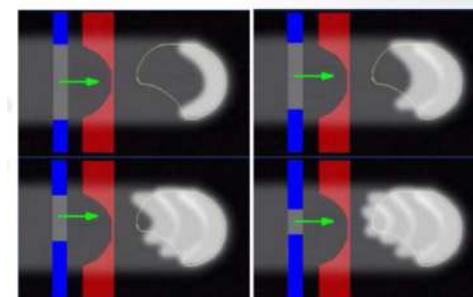
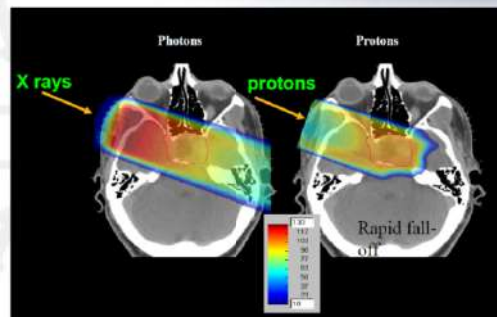
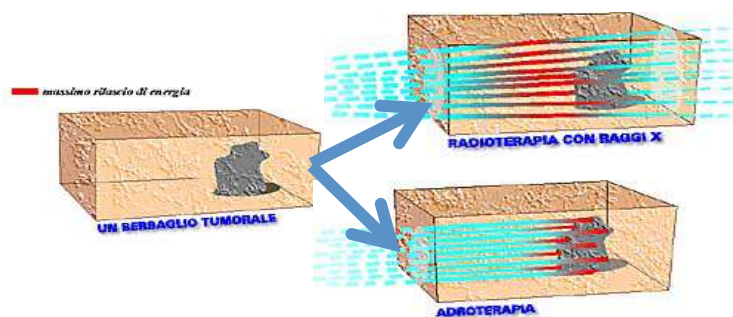
(c)



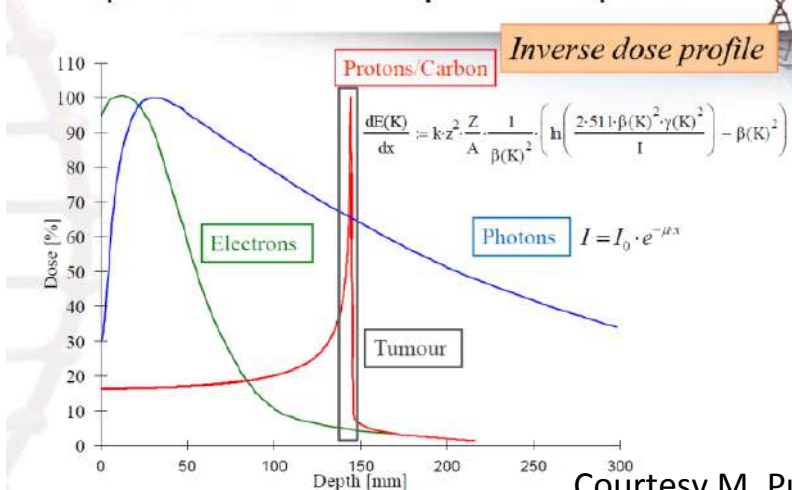
(d)

APPLICAZIONI MEDICHE: ADROTERAPIA

Terapia antitumorale basata sull'irraggiamento con protoni e ioni pesanti (C).
 E' più efficace e più localizzata (risonanza di Bragg) rispetto a quella basata su elettroni o raggi X
 Centri in funzione: CNAO a Pavia, PSI a Zurigo, Loma Linda in California, Giappone,...



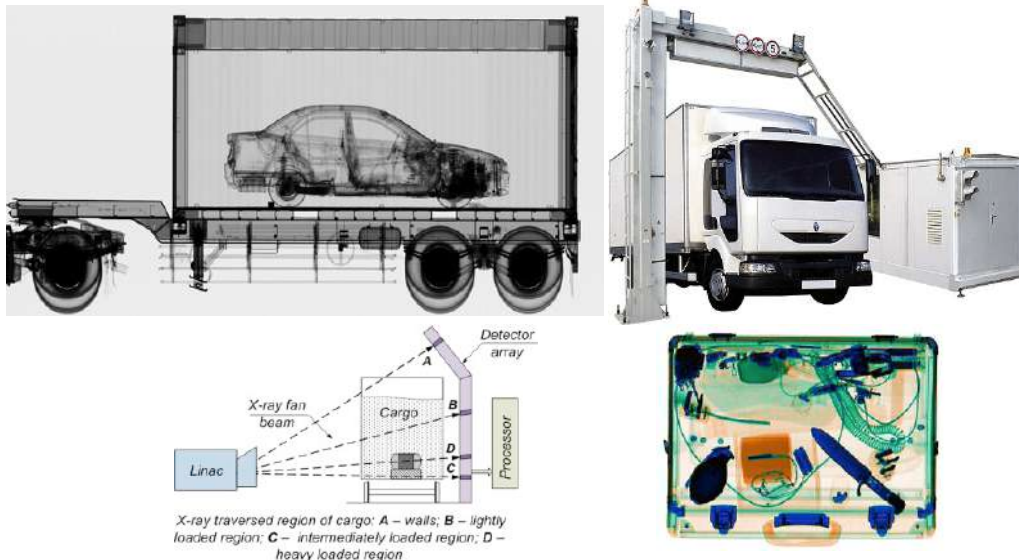
Comparison of the depth dose profiles



Courtesy M. Pullia

APPLICAZIONI INDUSTRIALI

Cargo Scan con raggi X



Trattamento di materiali polimerici: cross-linking

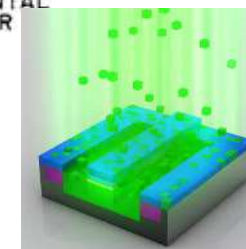
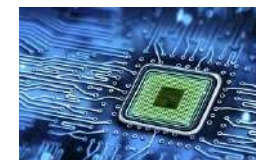
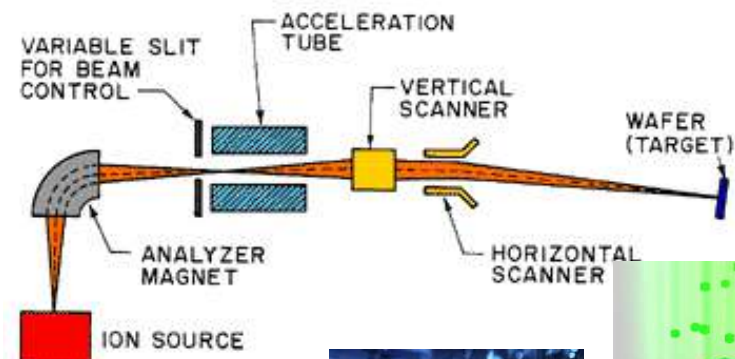
Tali trattamenti industriali aumentano le performances dei materiali in termini di resistenza al calore, elasticità, etc...



Sterilizzazione e irradiazione di cibi per conservazione ("pastorizzazione fredda")



Impiantazione ionica (semiconduttori)

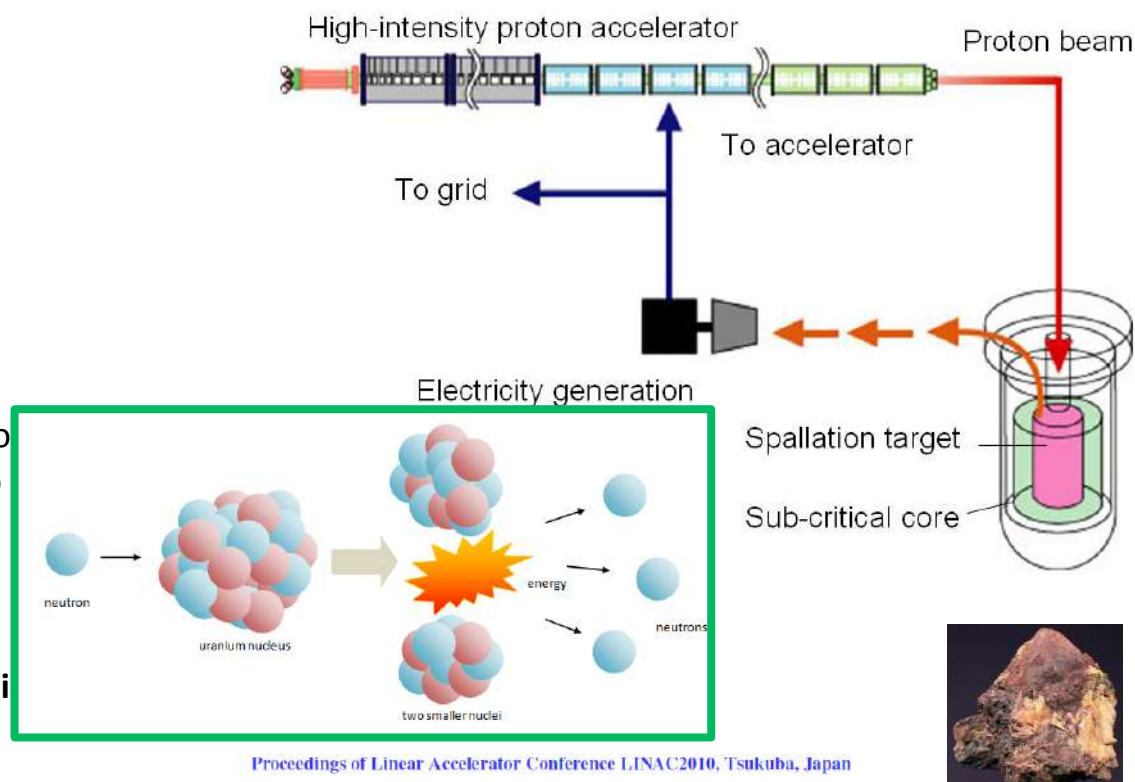


PRODUZIONE DI ENERGIA CON ACCELERATORI

Un ADS (Accelerator Driven System) è un reattore nucleare a fissione sottocritico pilotato da un acceleratore di protoni ad alta energia (600 MeV- 1GeV). I neutroni necessari per sostenere il processo di fissione sono forniti dall'acceleratore di particelle

Vantaggi:

- Utilizza **torio come combustibile**, molto abbondante dell'uranio e del plutonio
- breve vita dei prodotti di scarto** (dell'ordine dei 100 anni contro le centinaia di migliaia di anni dei reattori attuali).
- reattore intrinsecamente sicuro** (fissi controllata)



Proceedings of Linear Accelerator Conference LINAC2010, Tsukuba, Japan

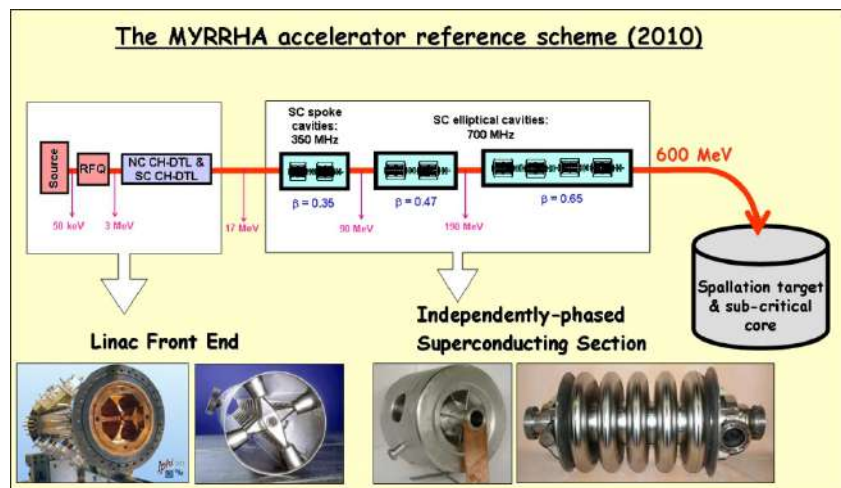
PROTON LINAC FOR ADS APPLICATION IN CHINA

Shinian Fu, Shouxian Fang, Jiuqing Wang

IHEP, Institute of High Energy Physics, Beijing 100049, China

Xialing Guan

CIAE, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China



Alcuni esperimenti di laboratorio e molti studi teorici hanno dimostrato la possibilità teorica di tale impianto. **Carlo Rubbia**, è stato uno dei primi a concepire un progetto di un reattore subcritico, il cosiddetto "**amplificatore di energia**".

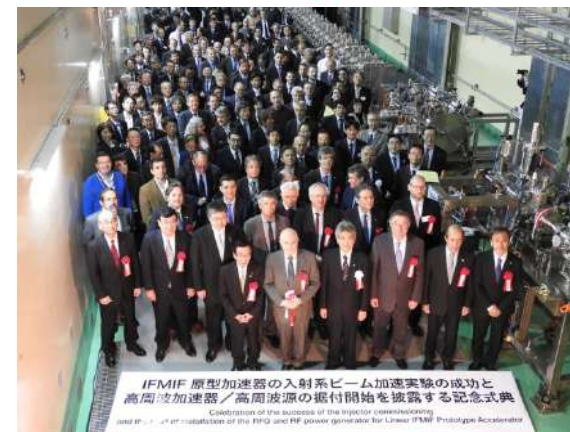
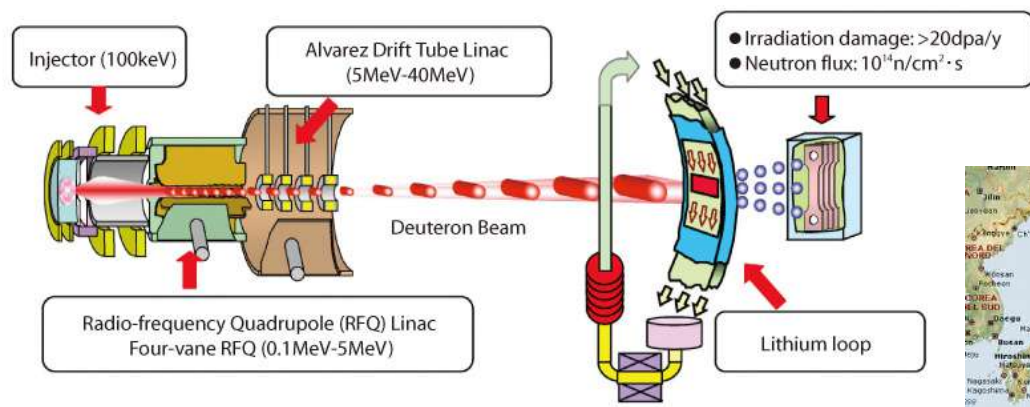
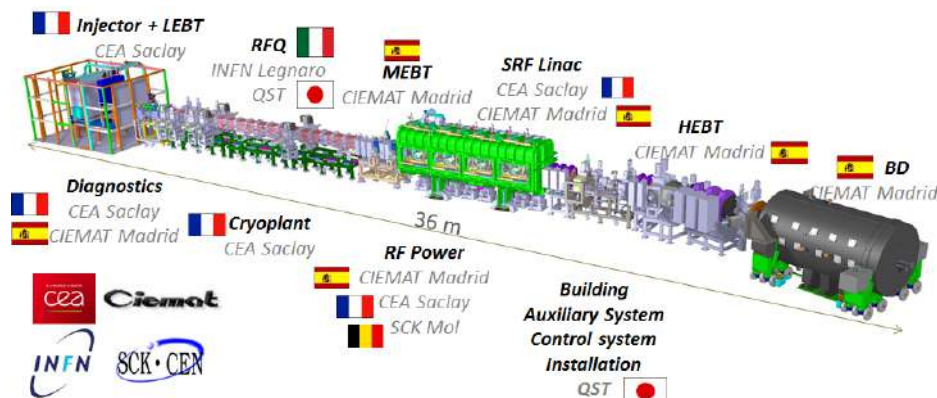
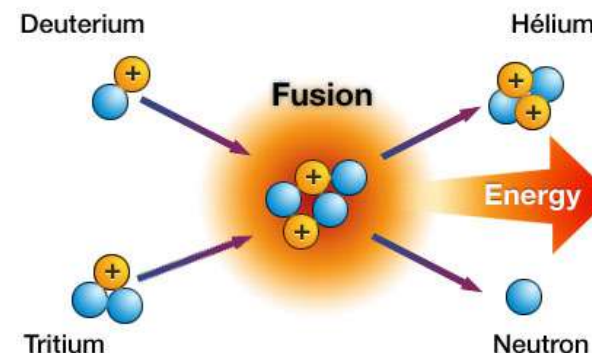
Nel 2012 gli scienziati e gli ingegneri del CERN hanno lanciato l'International Thorium Energy Committee (iThEC) un'organizzazione dedicata a perseguire questo obiettivo.

TEST DI MATERIALI PER REATTORI A FUSIONE NUCLEARE

In un **futuro reattore a fusione nucleare deuterio-trizio** le reazioni di fusione generano un **flusso di neutroni** dell'ordine di $10^{18} \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ con una energia di 14.1 MeV che collide contro le **pareti interne** del reattore

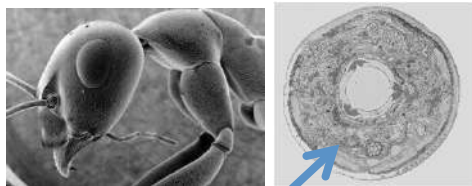


L'**International Fusion Materials Irradiation Facility (IFMIF)**, è un **impianto di test di materiali** utilizzabili in un reattore di fusione. E' una **sorgente di neutroni** basata sul un acceleratore di deuterio che collidendo contro atomi di **litio** produce un flusso di neutroni analogo a quello previsto nella prima parete di un reattore a fusione.



ESPLORARE LA MATERIA CON RADIAZIONE DI LUNGHEZZA D'ONDA SEMPRE PIU' PICCOLA

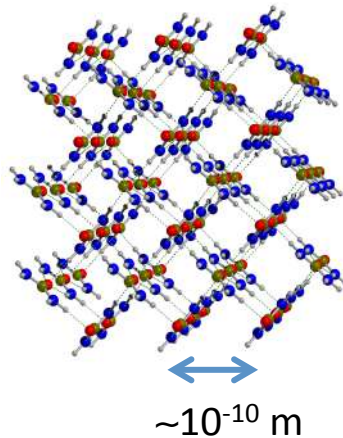
Luce visibile:
400-700 nm ($\sim 10^{-7}$ m)



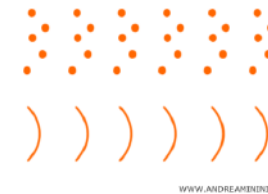
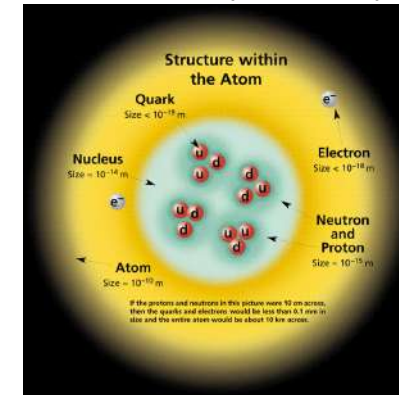
1-10 μm

Risoluzione 200 nm

Raggi X:
0.01-10 nm ($\sim 10^{-11}$ - 10^{-8} m)



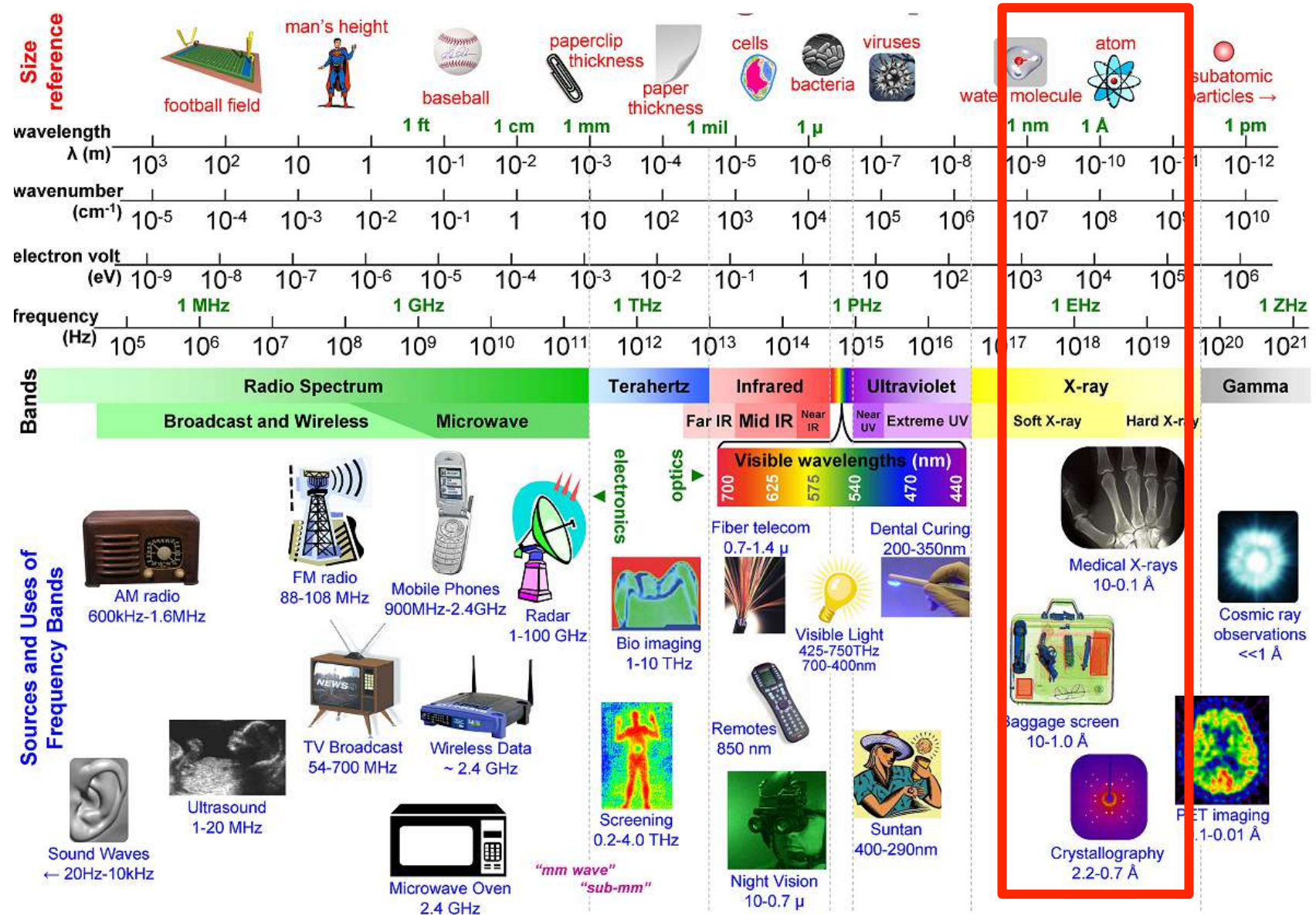
Particelle accelerate
<0.01 nm ($<10^{-11}$ m)



FOTONI

PARTICELLE IN GENERALE

FISICA DELLA MATERIA: SORGENTI DI LUCE DI SICROTRONE E LASER AD ELETTRONI LIBERI

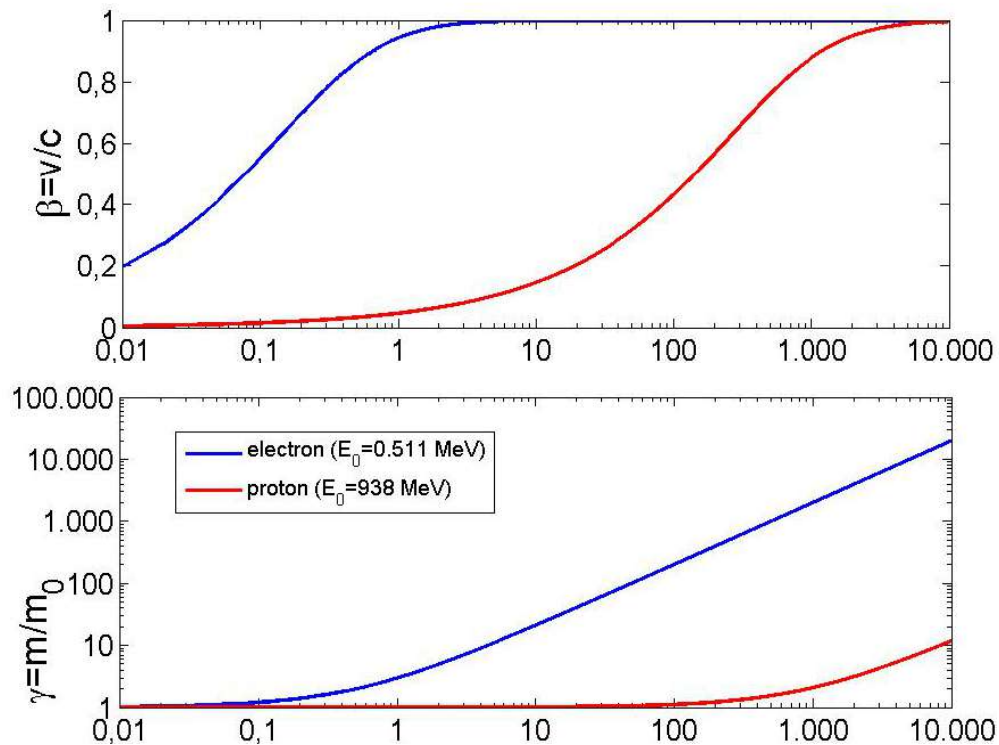
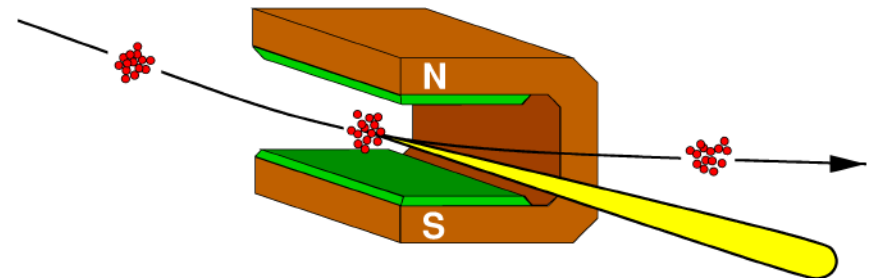
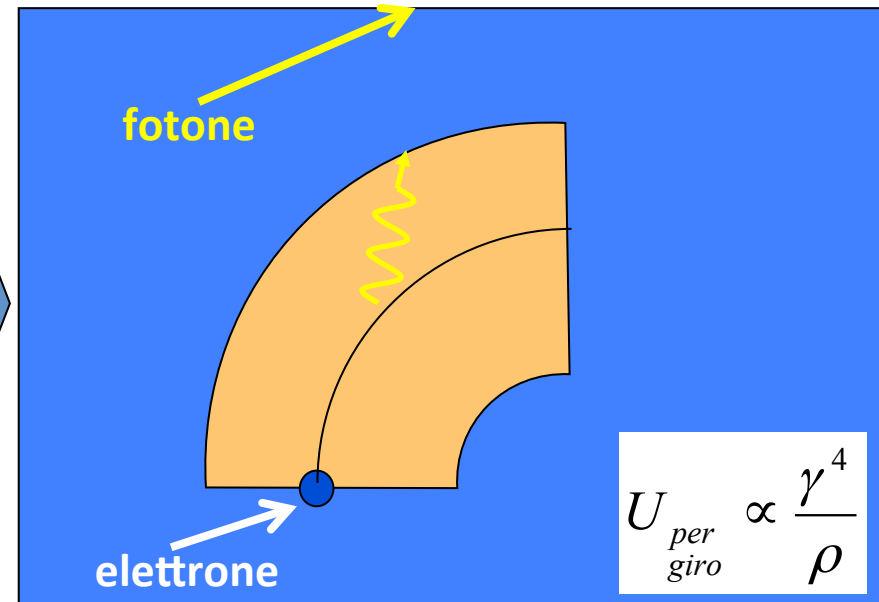


LE PARTICELLE IN MOVIMENTO POSSONO EMETTERE RAGGI X?

Una particella carica ad una certa energia che viene fatta curvare tramite un magnete emette **radiazione elettromagnetica** (luce di sincrotrone).

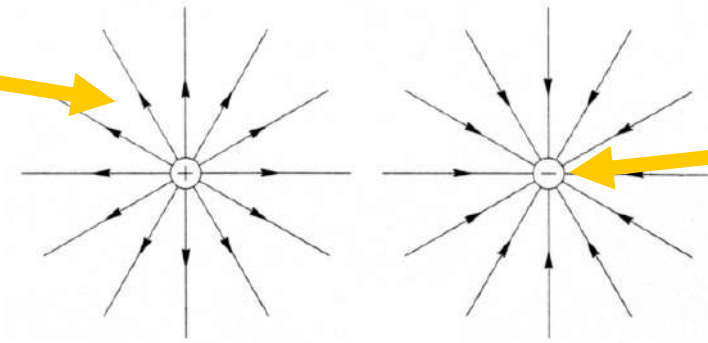
Tale fenomeno è tanto più accentuato quanto più la particella è relativistica ($\gamma > 1$) ovvero si muove a **velocità prossime a quella della luce**.

Ne consegue che **solo le macchine ad elettroni** (particelle leggere) emettono fotoni (eccetto LHC!).

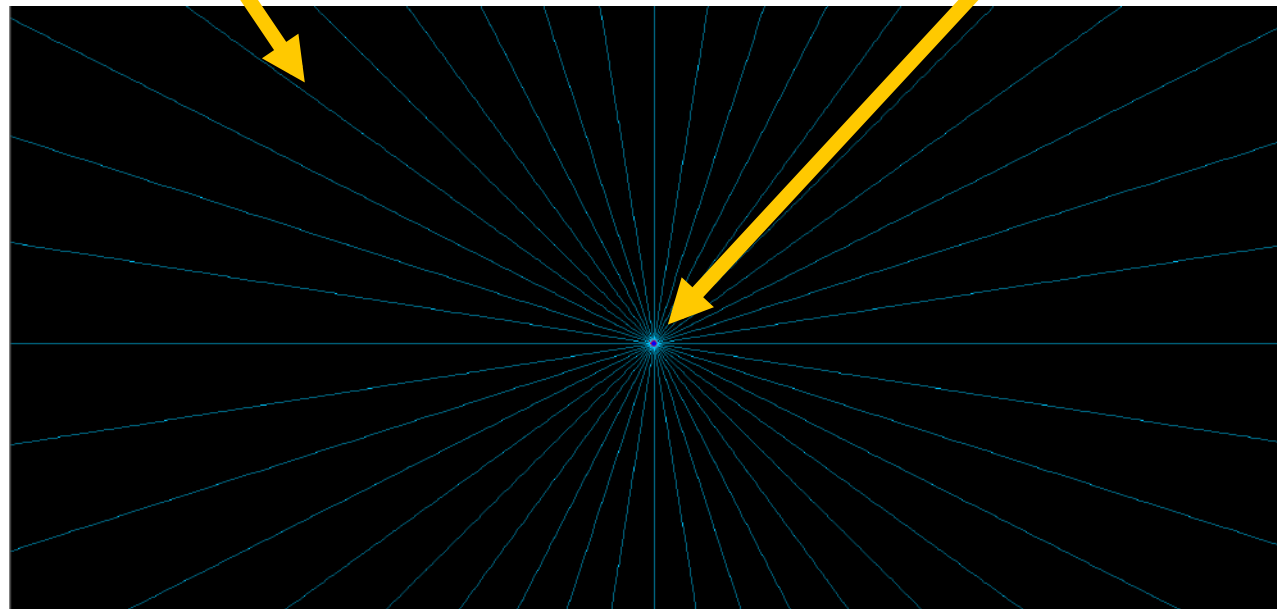


RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE

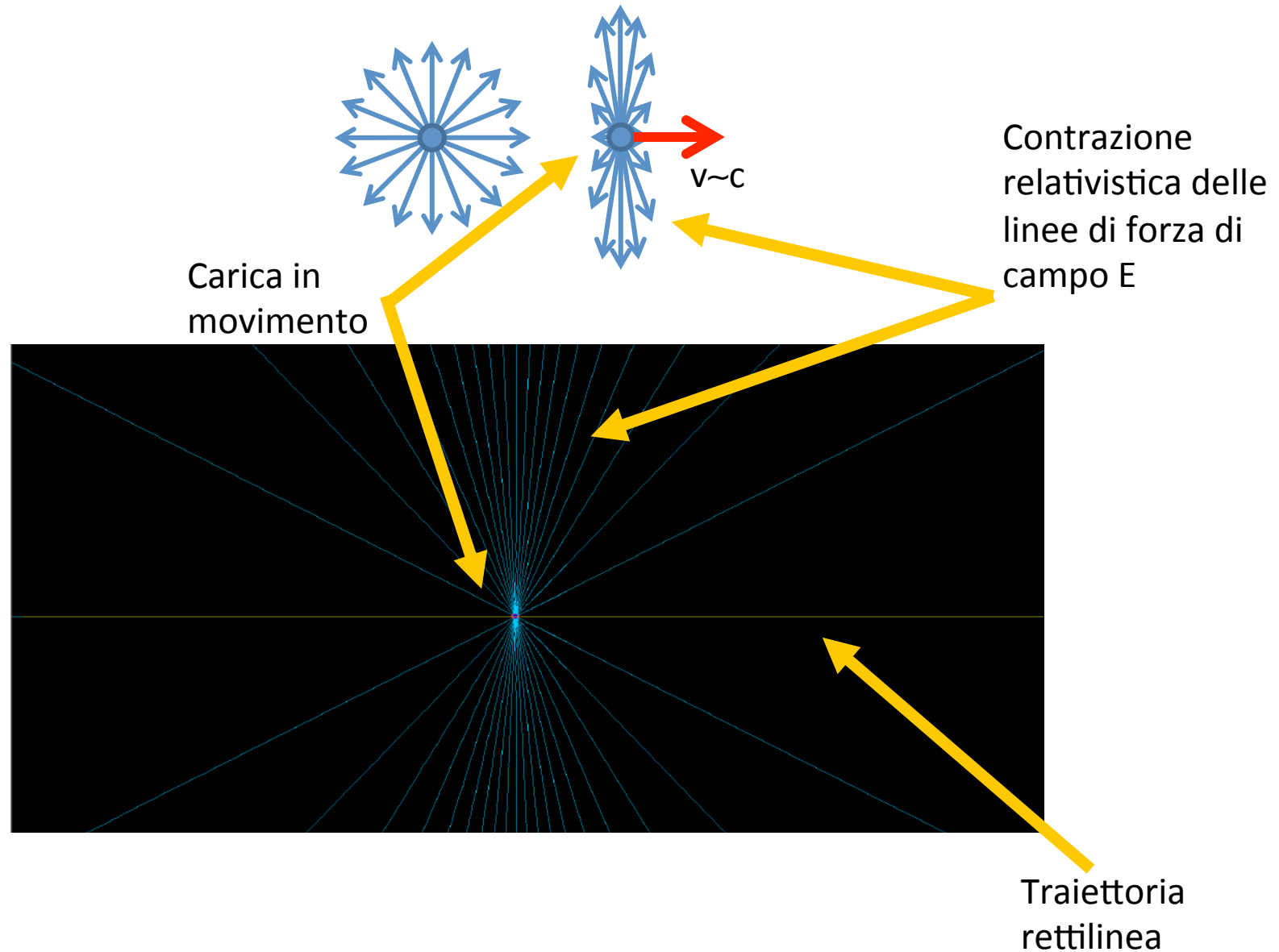
Campo elettrico



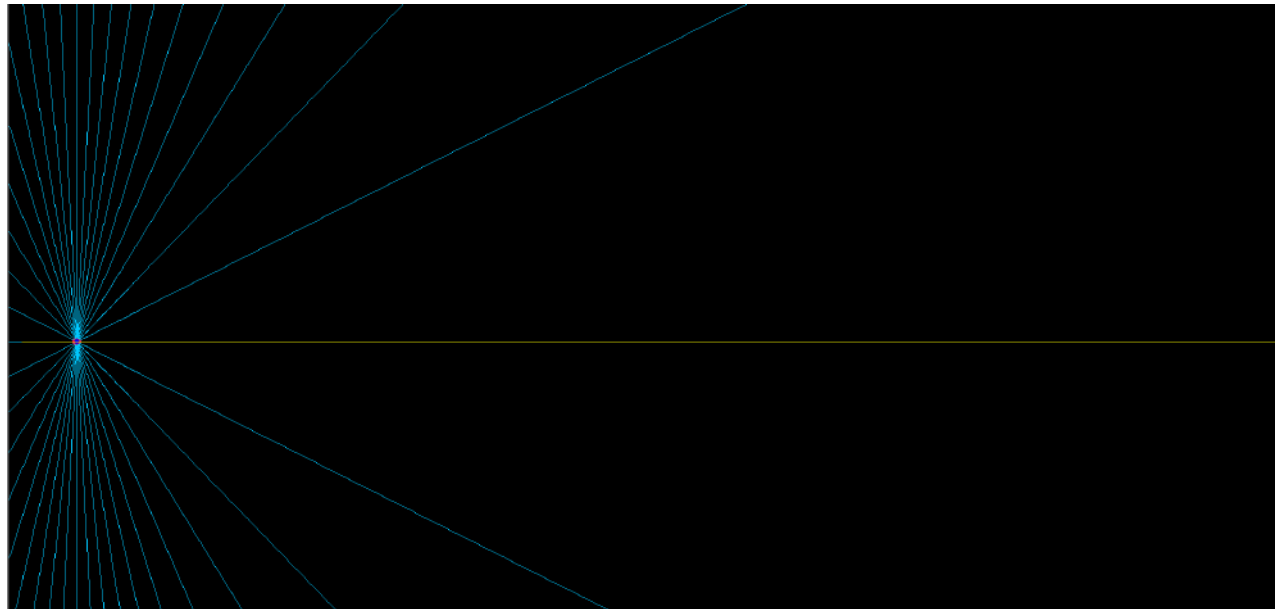
Carica ferma



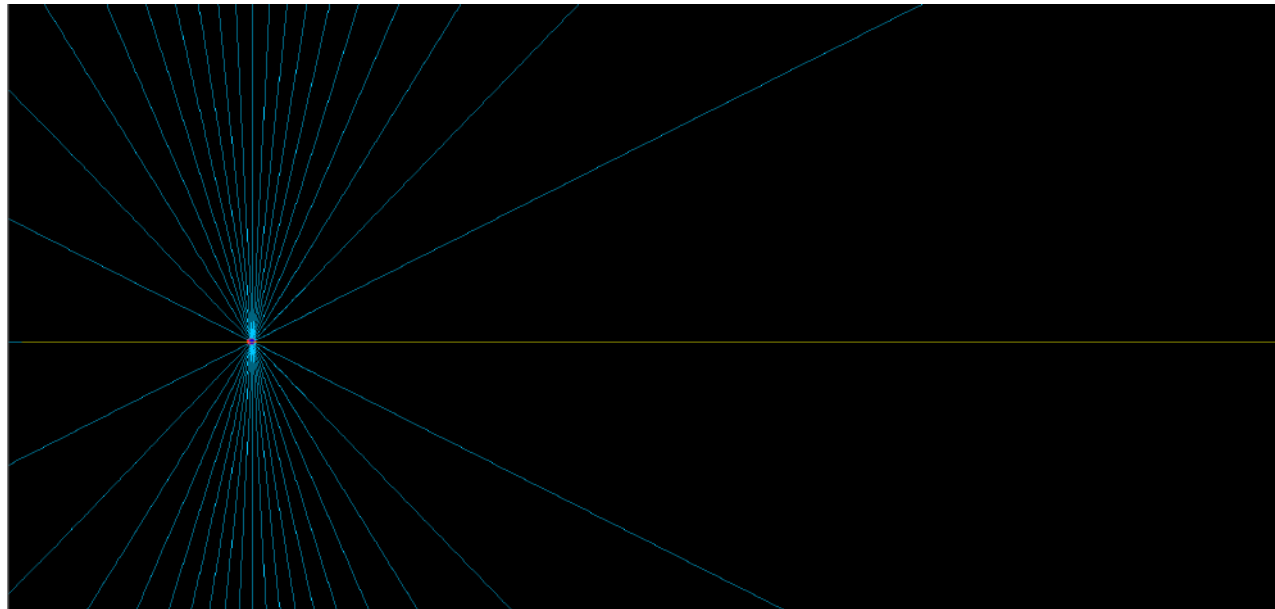
RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE



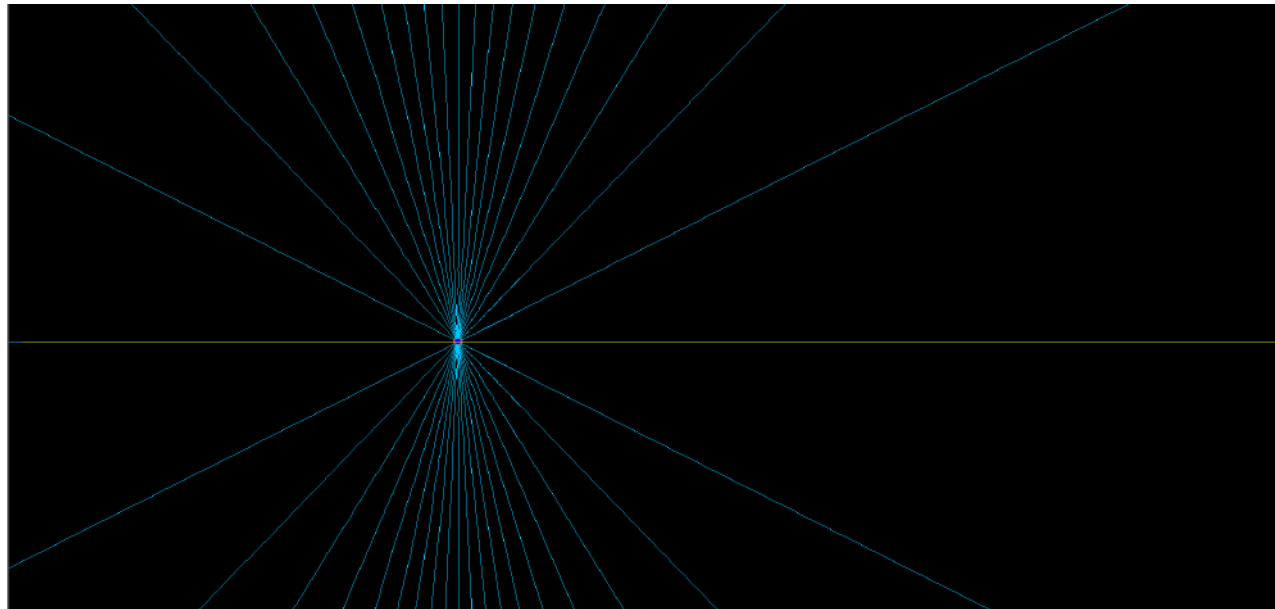
RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE



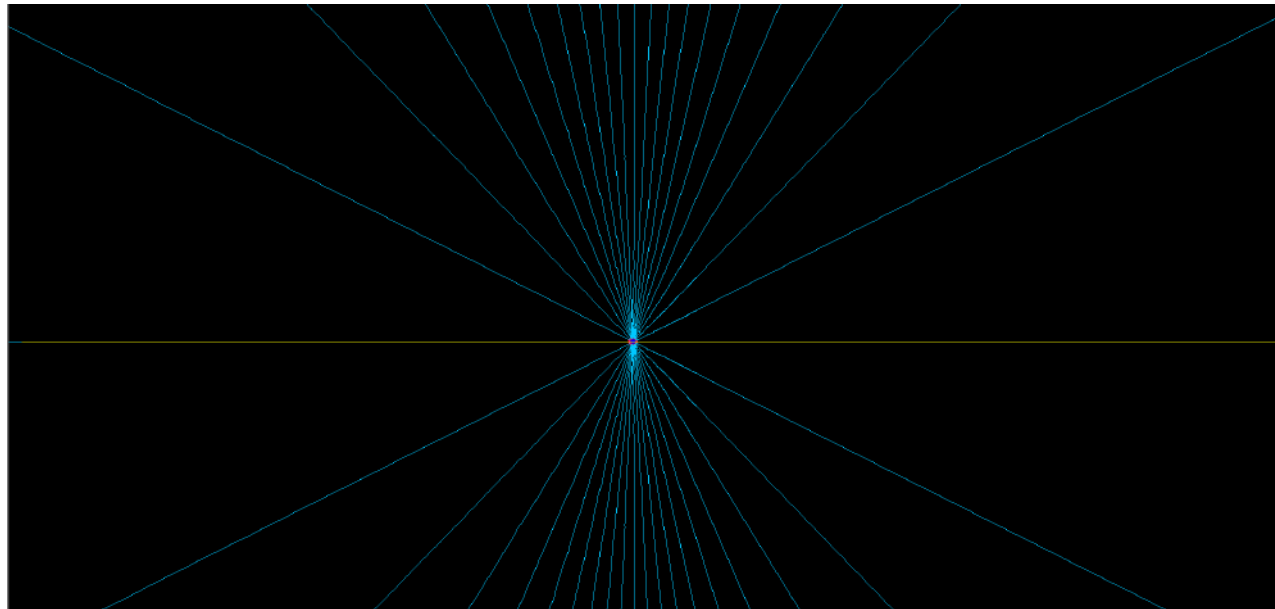
RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE



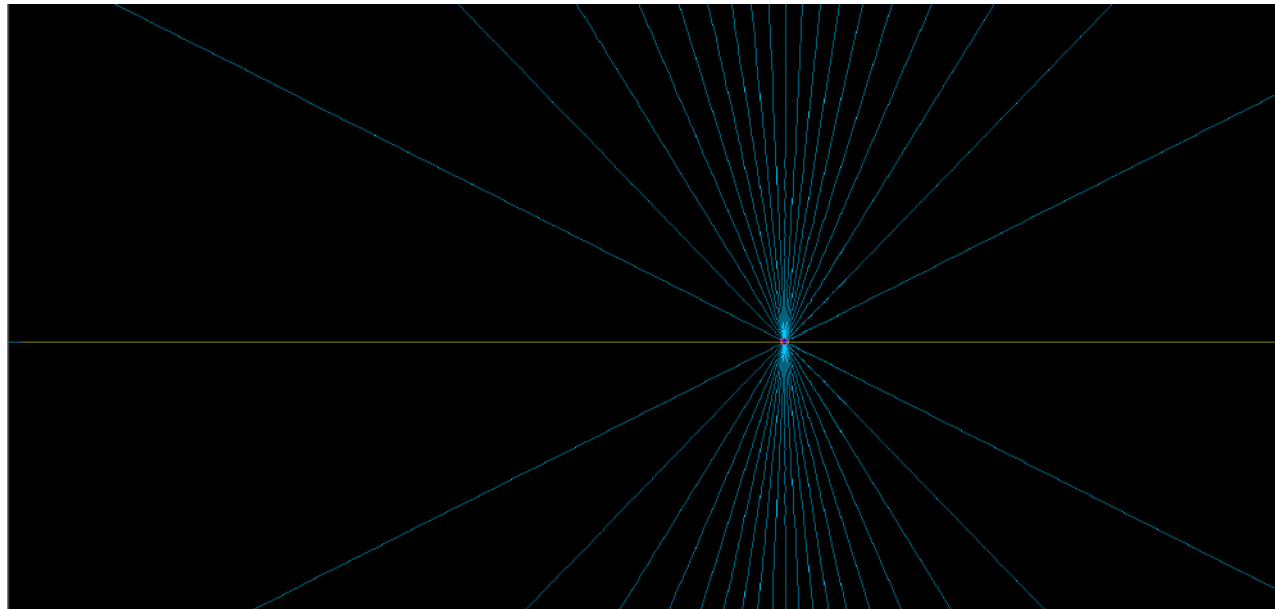
RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE



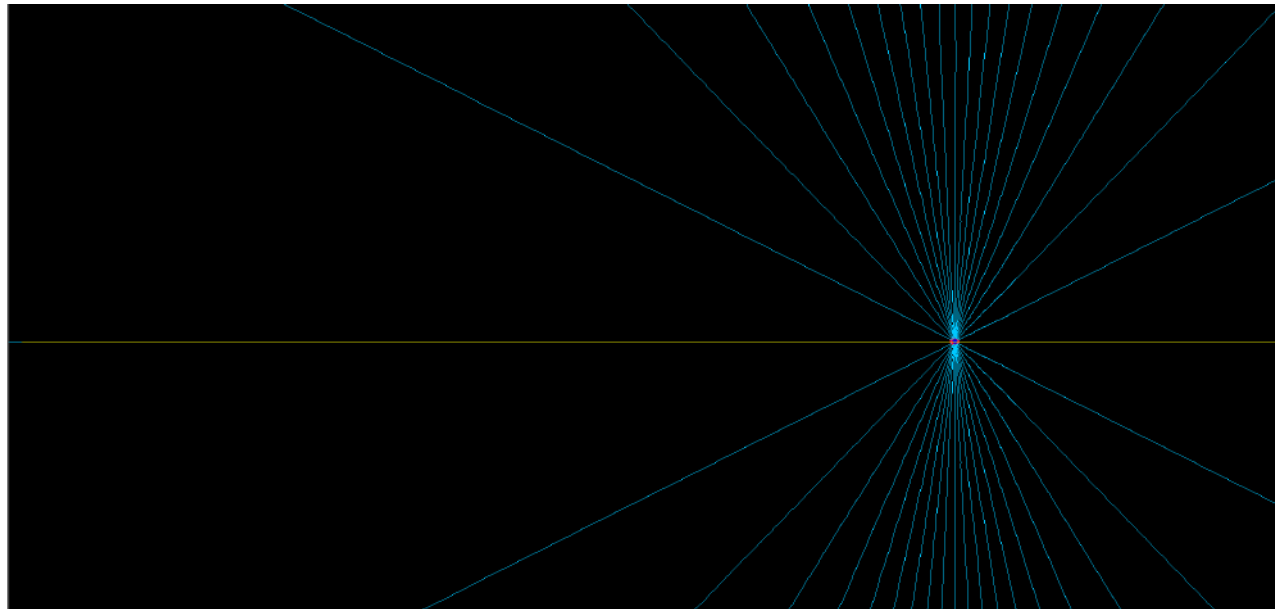
RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE



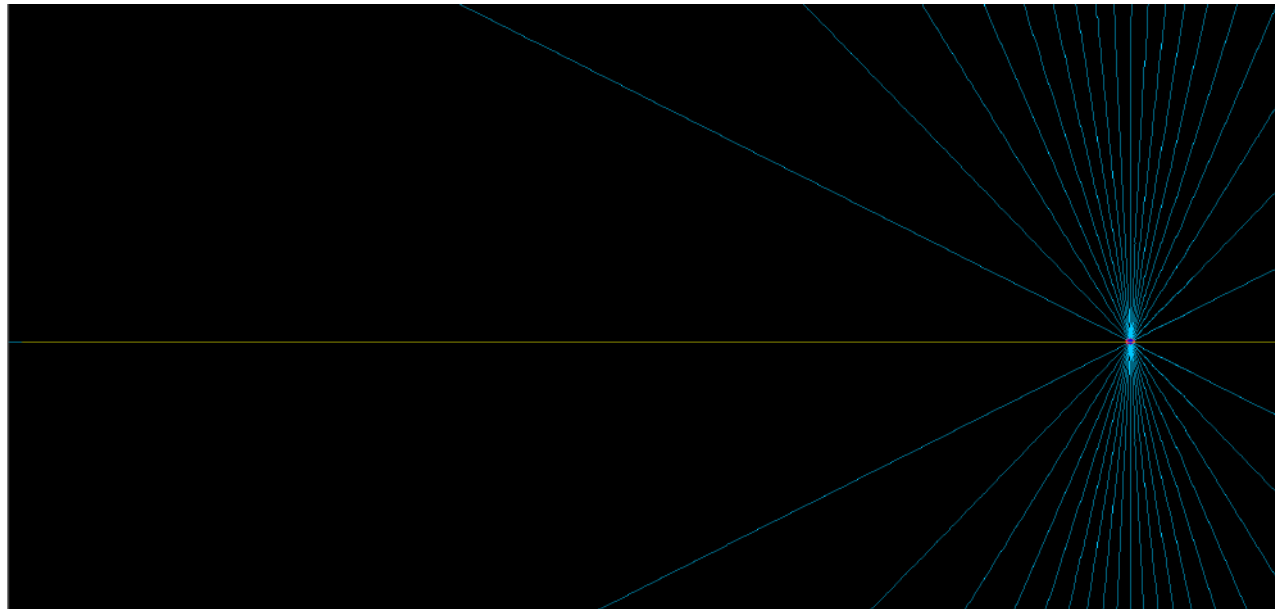
RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE



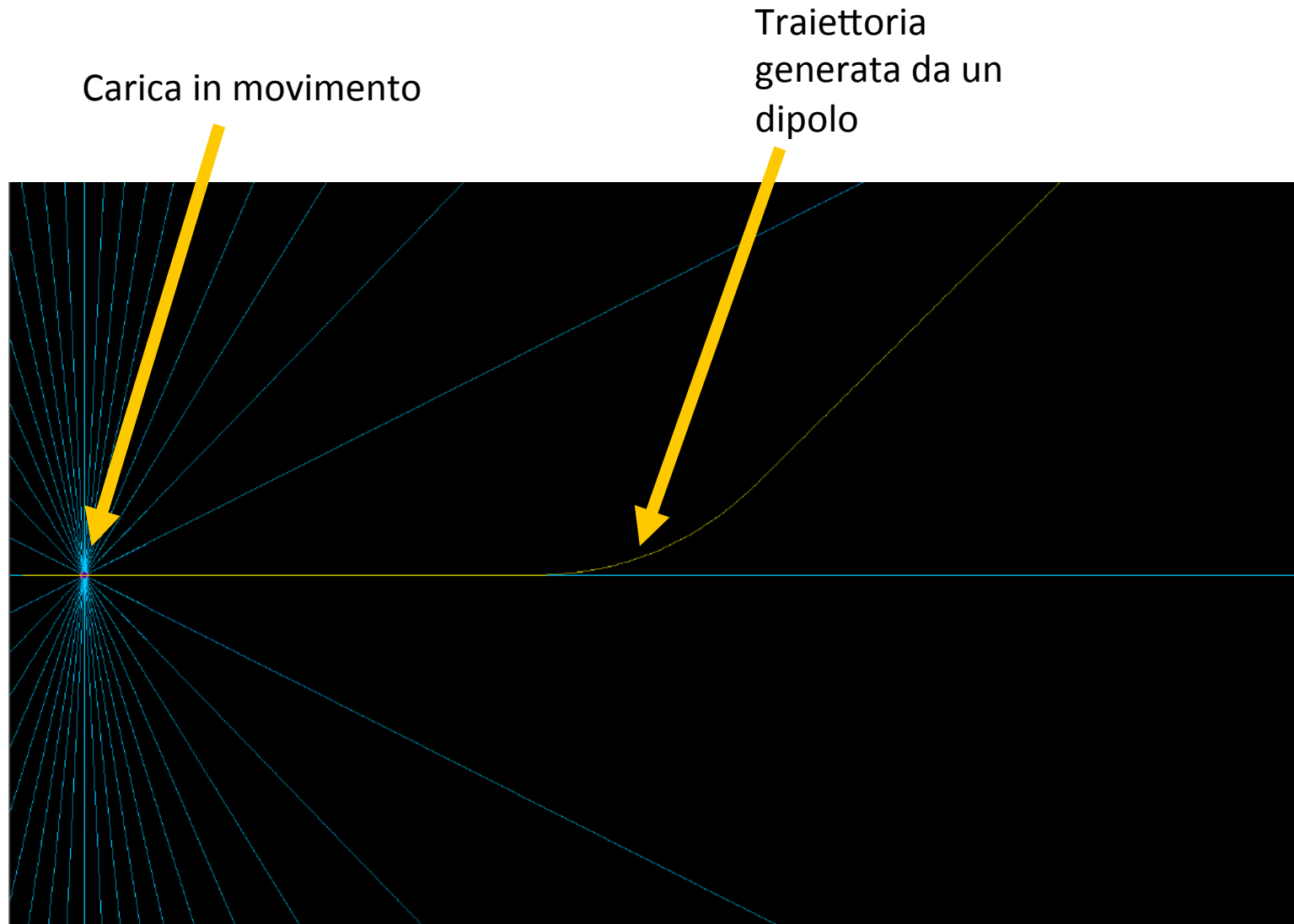
RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE



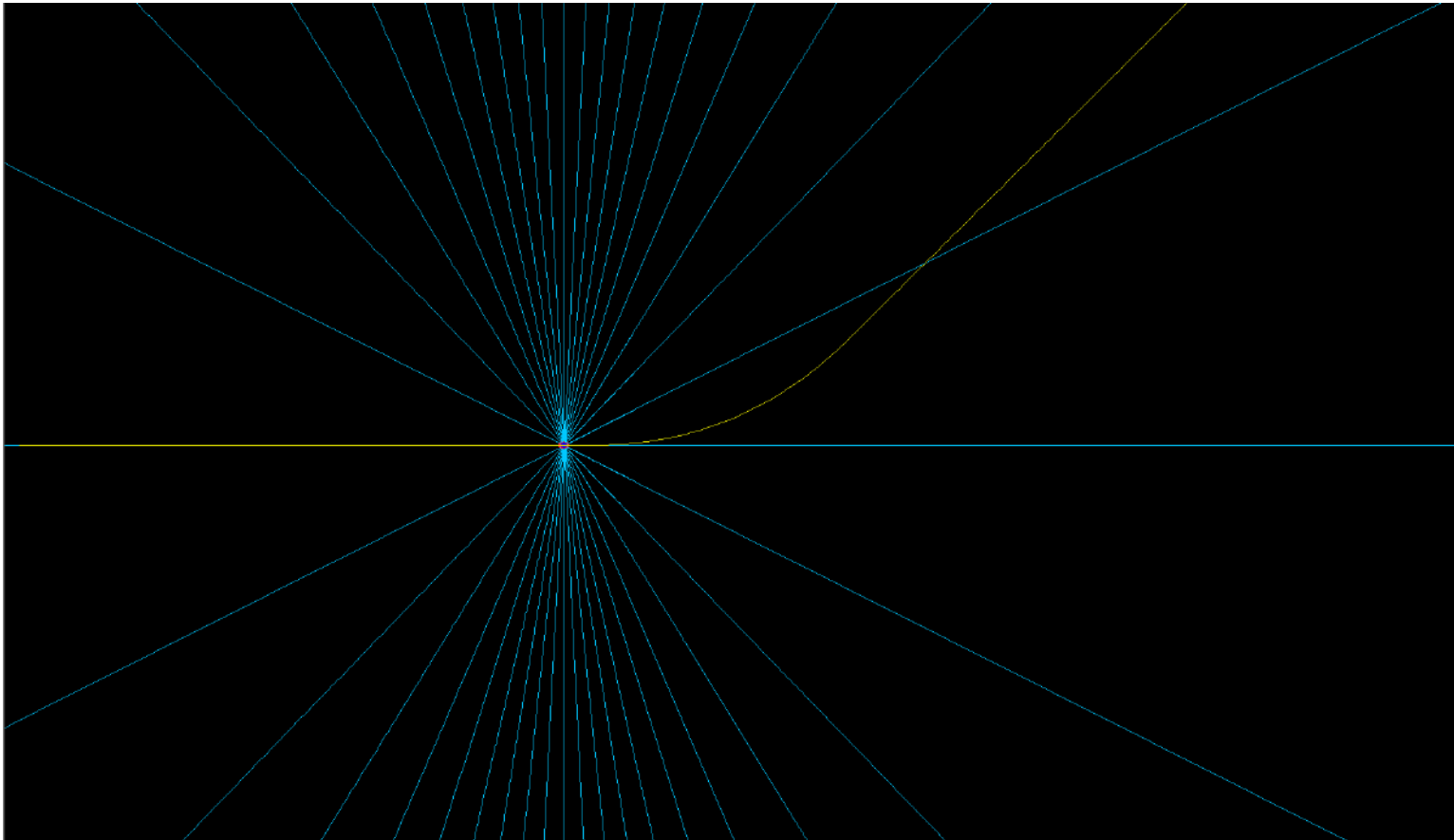
RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE



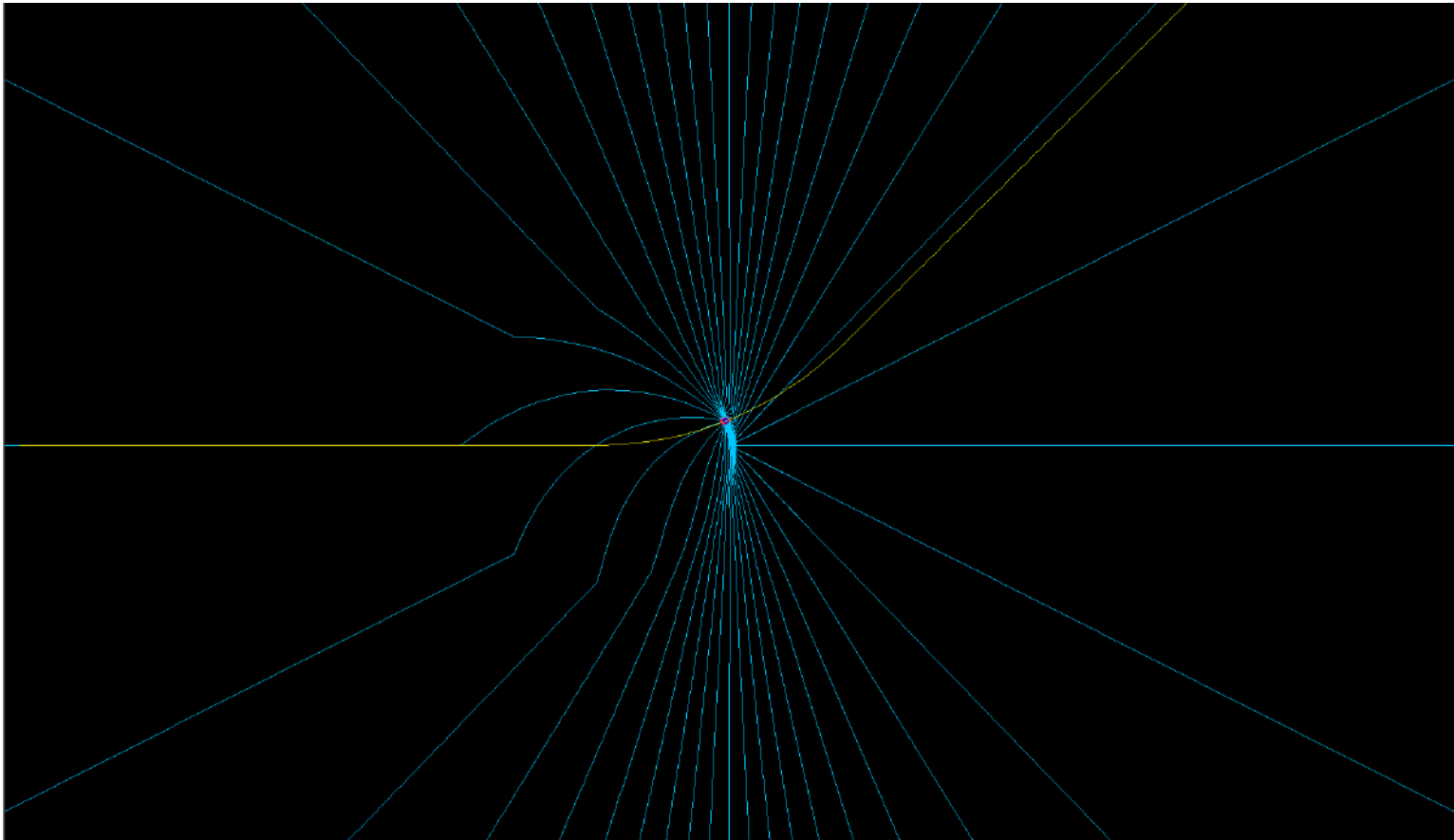
RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: DIPOLO



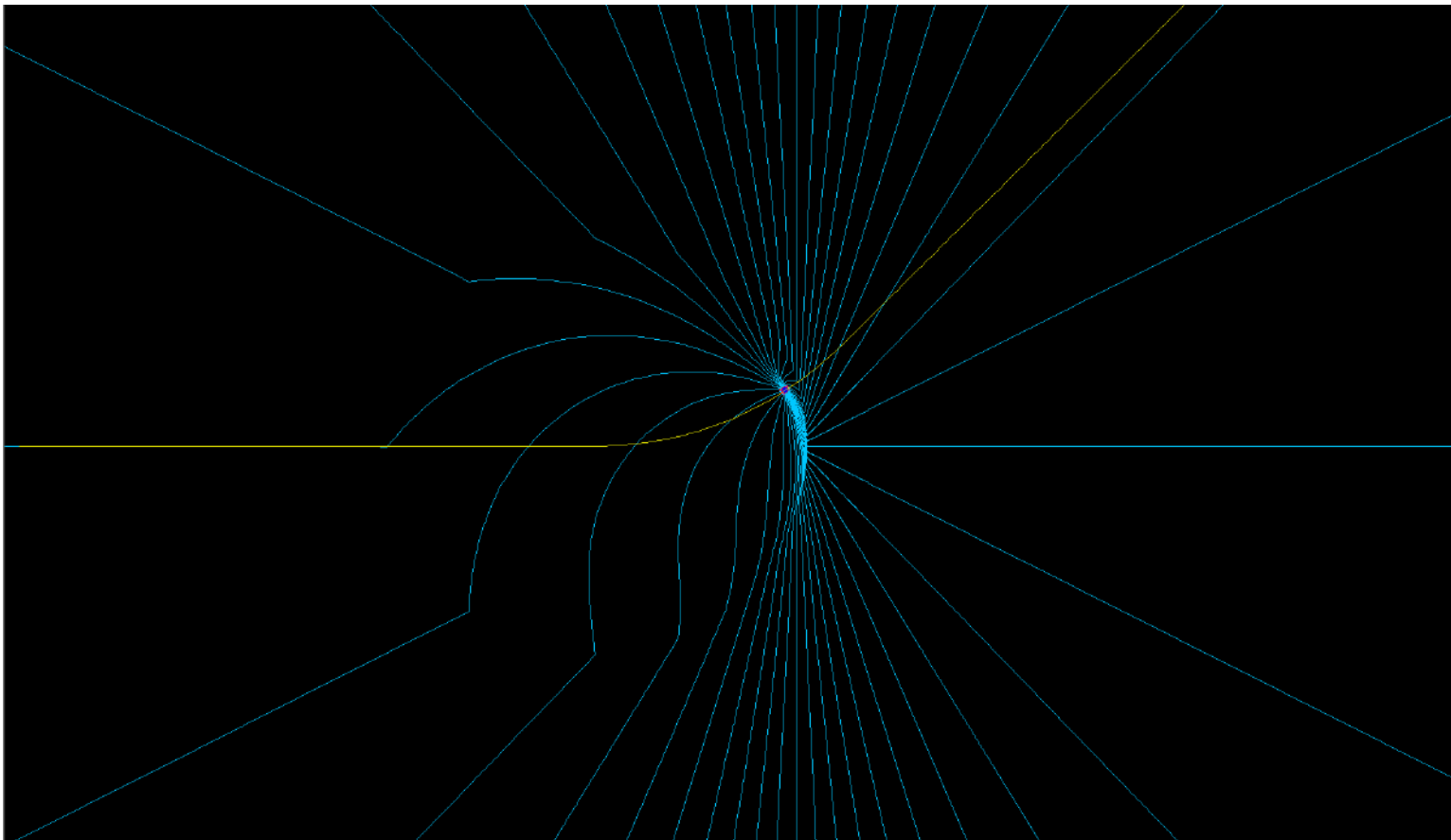
RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: DIPOLO



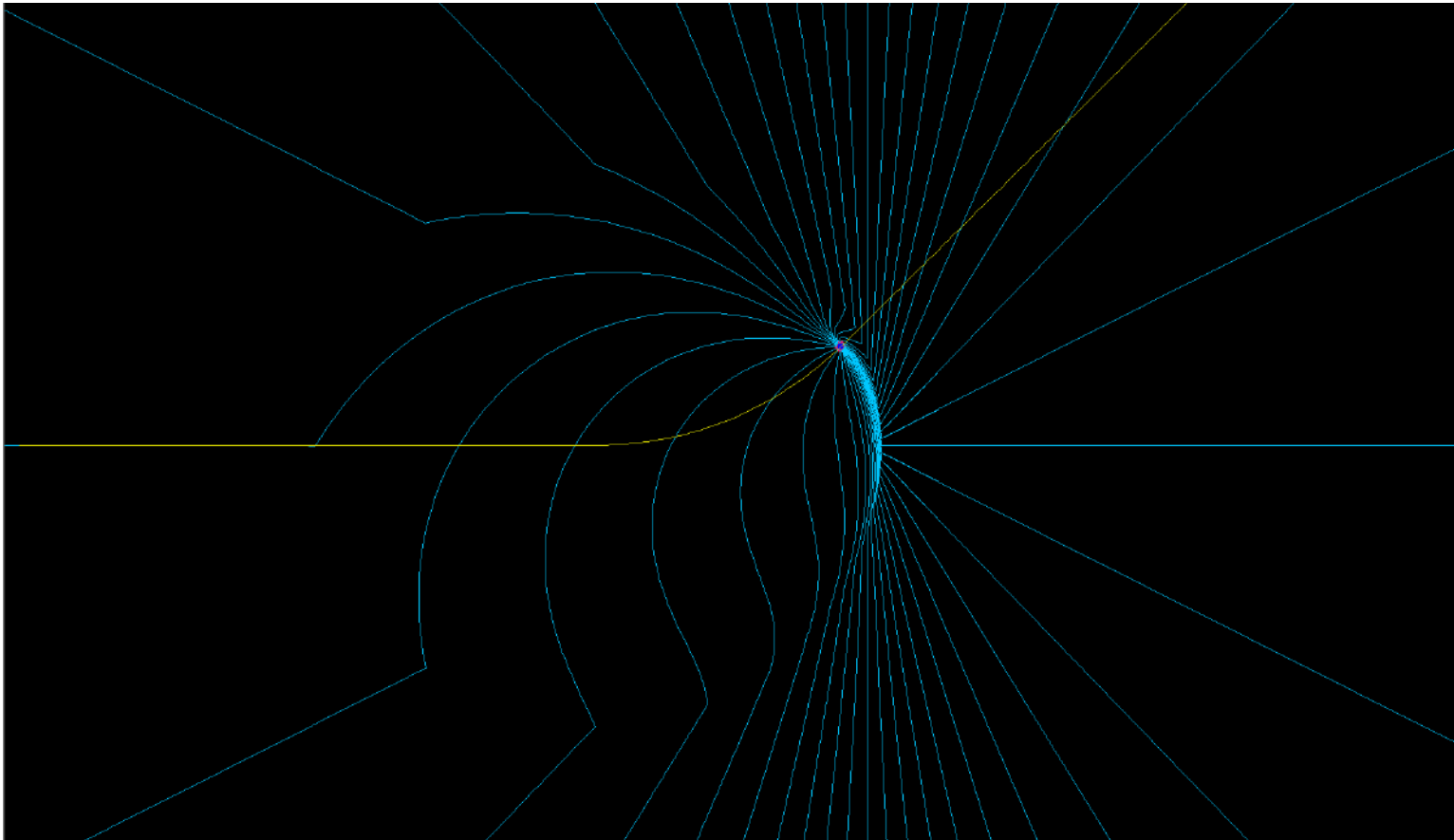
RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: DIPOLO



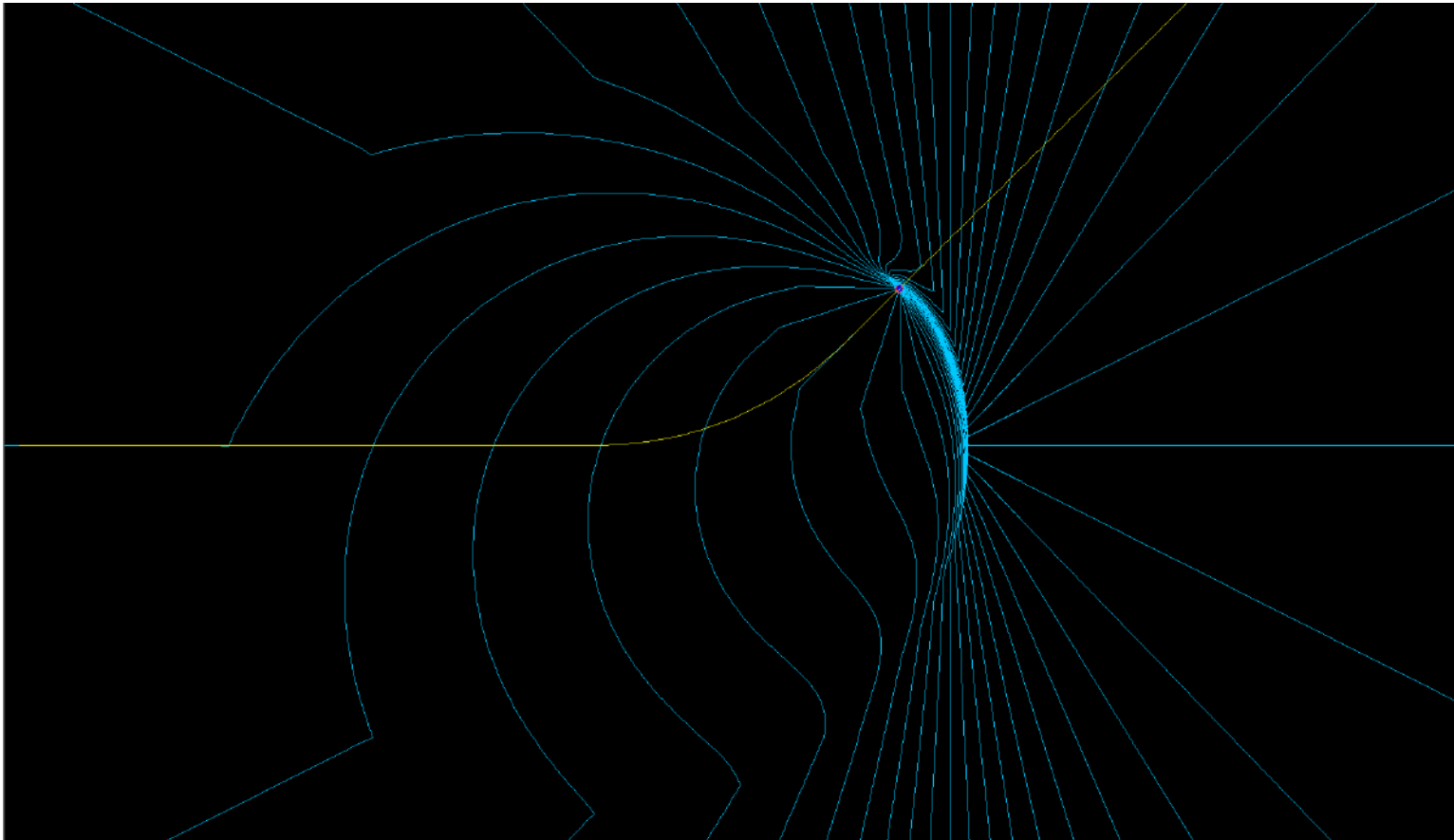
RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: DIPOLO



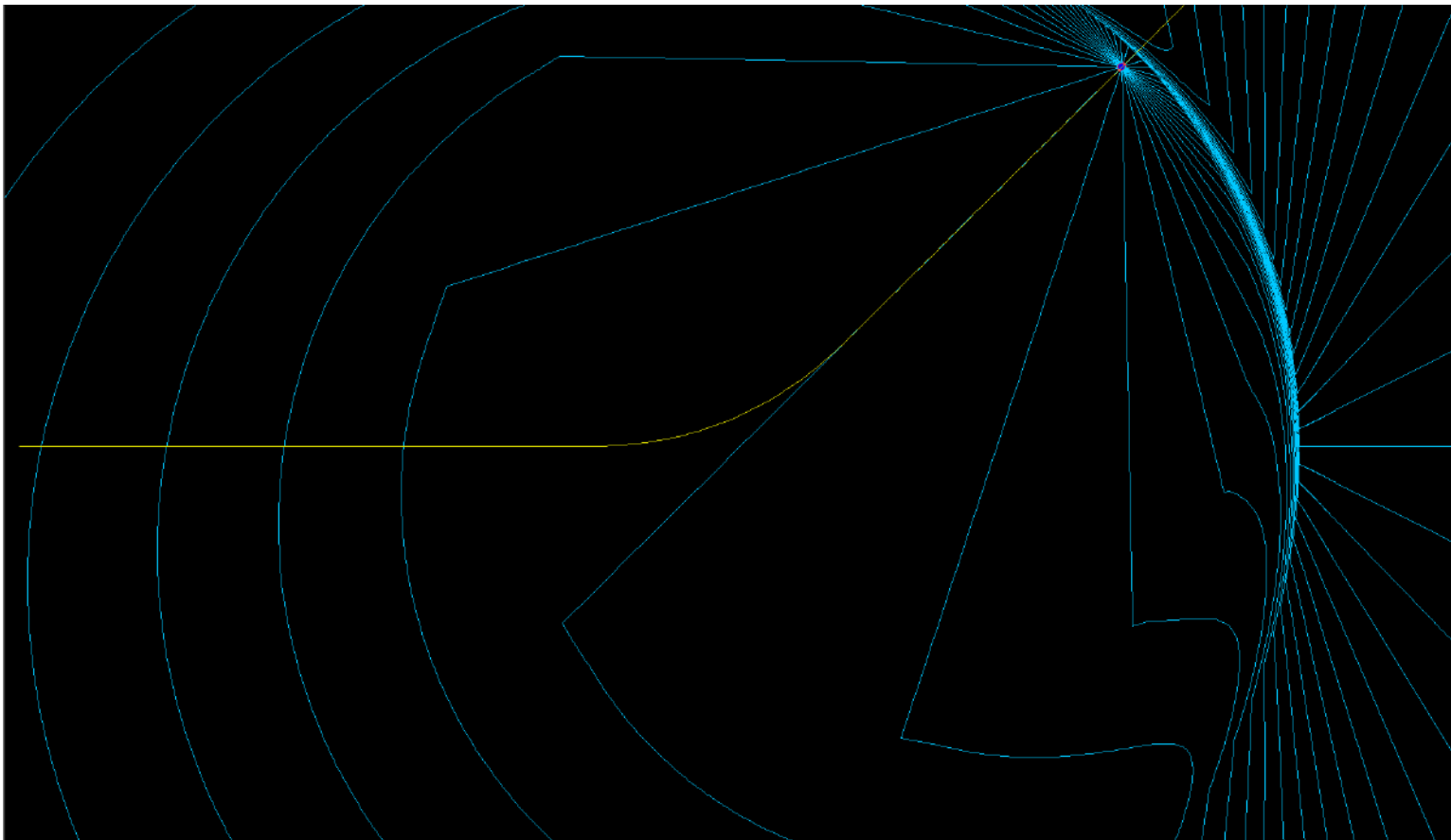
RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: DIPOLO



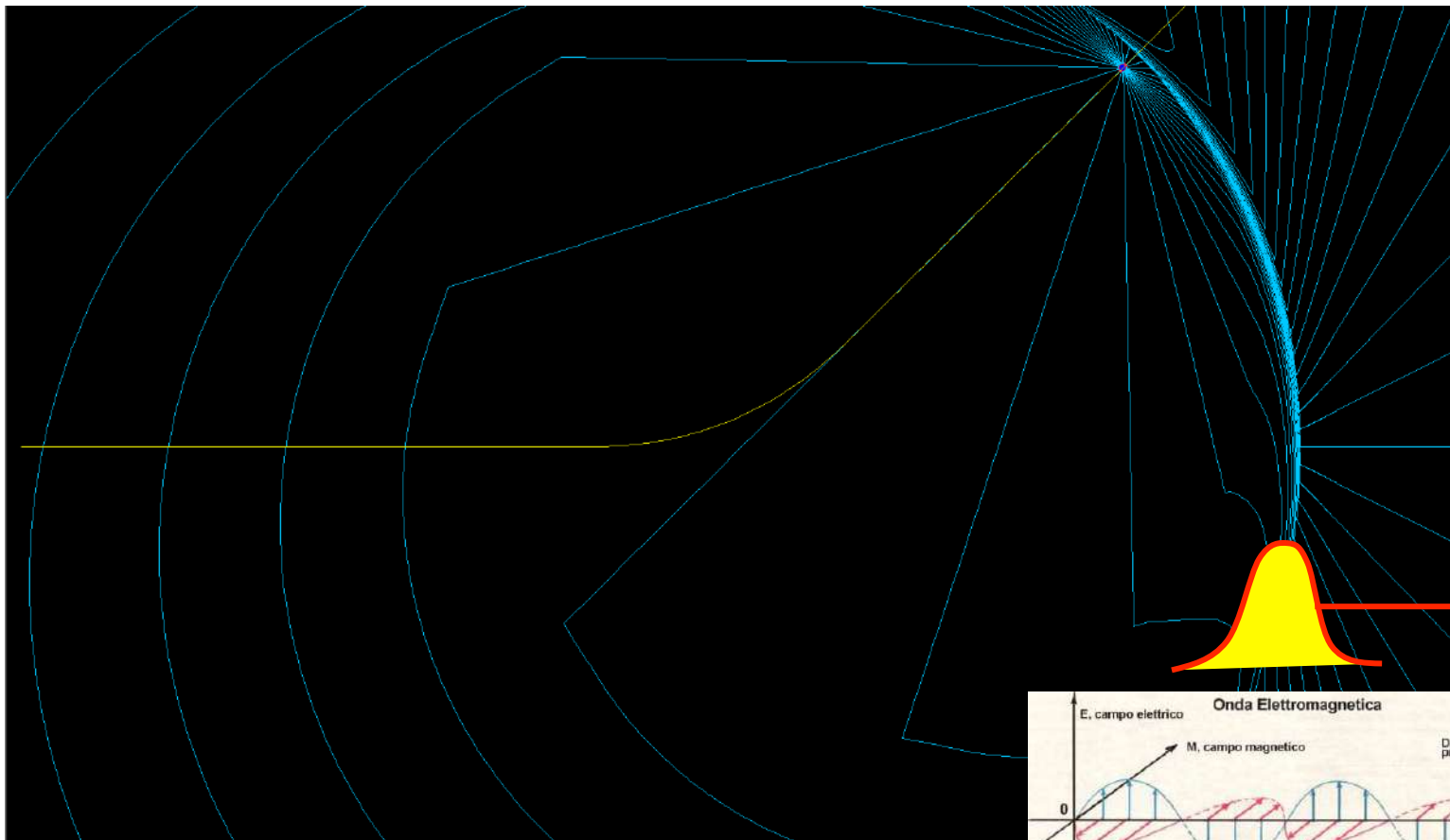
RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: DIPOLO



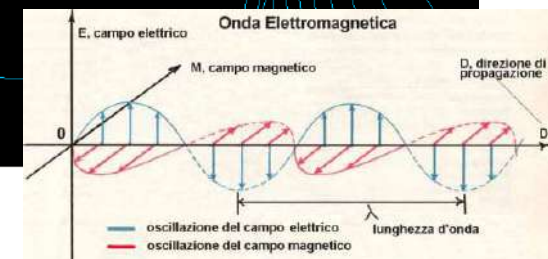
RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: DIPOLO



RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: DIPOLO

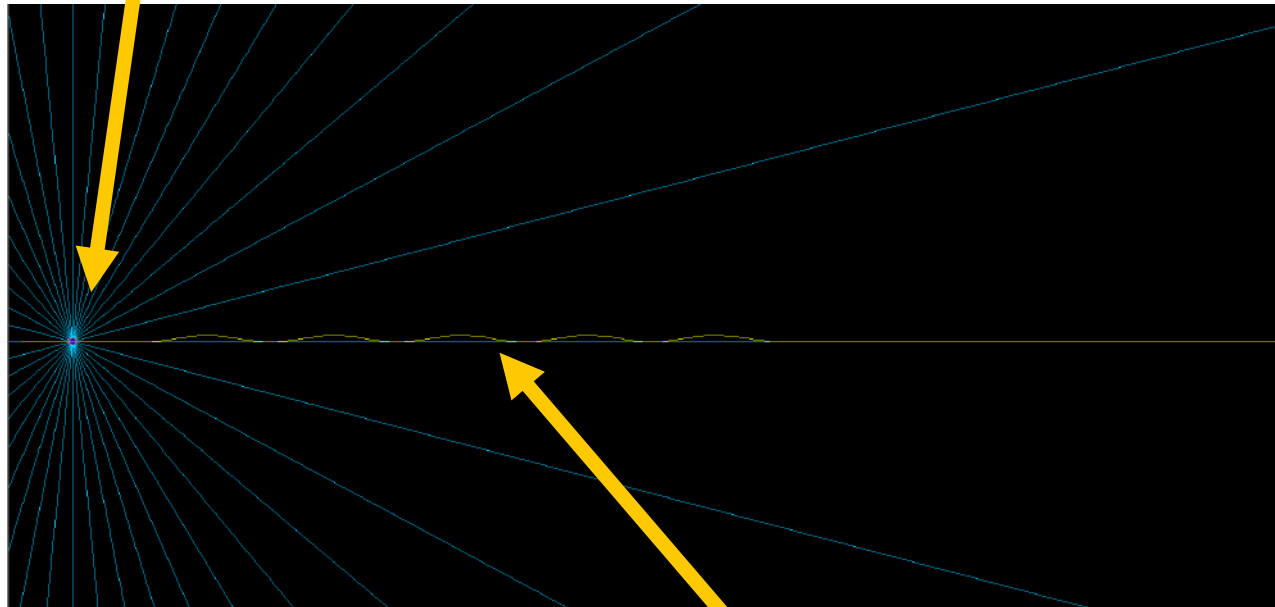
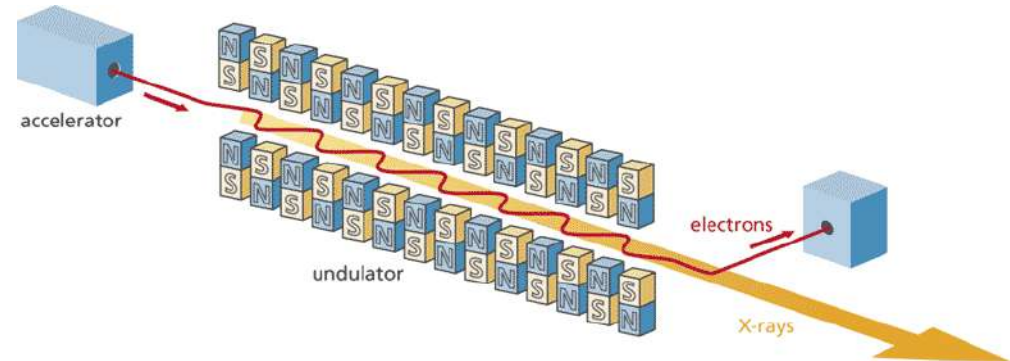


Onda piana



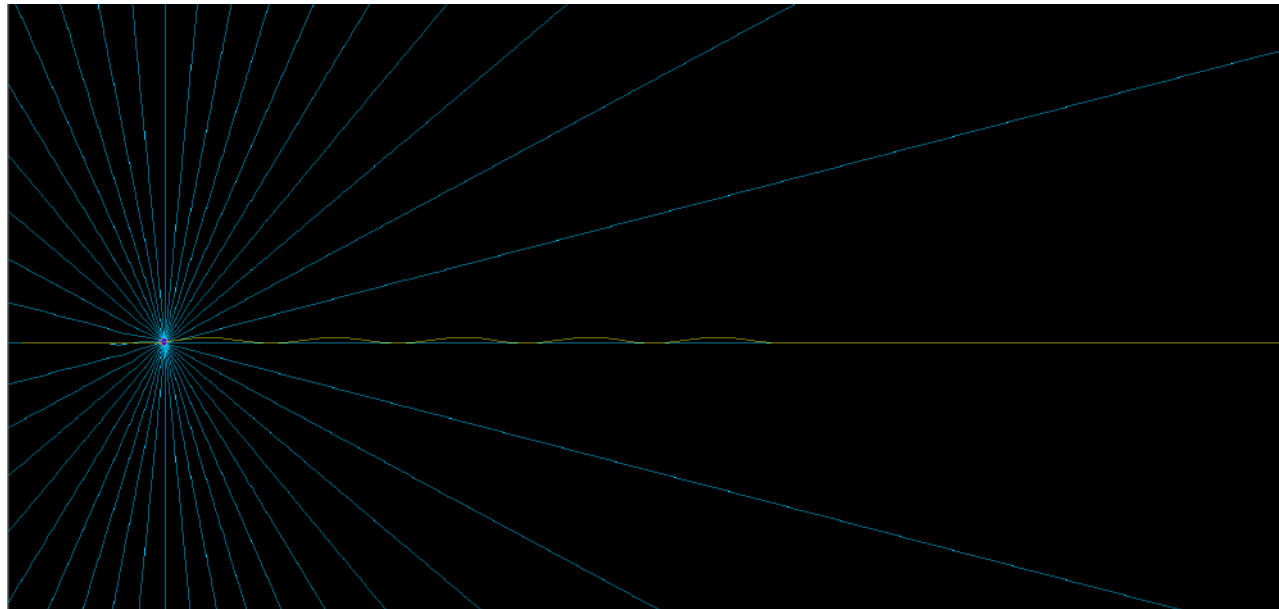
RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: ONDULATORE

Carica in movimento

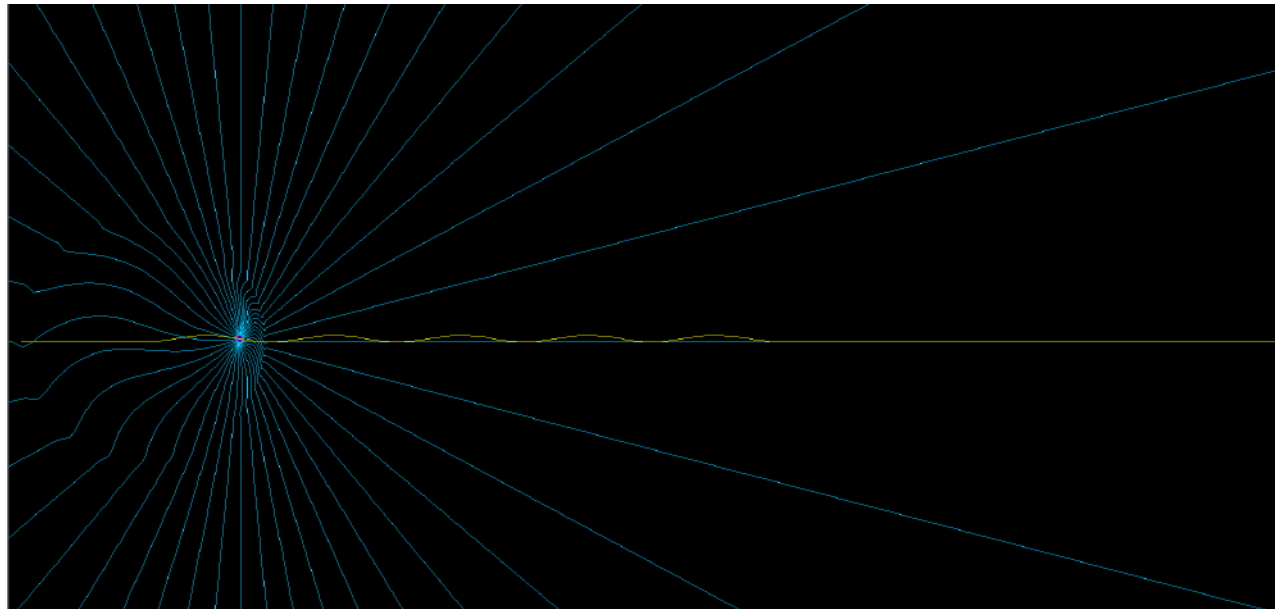


Traiettoria in un
ondulatore

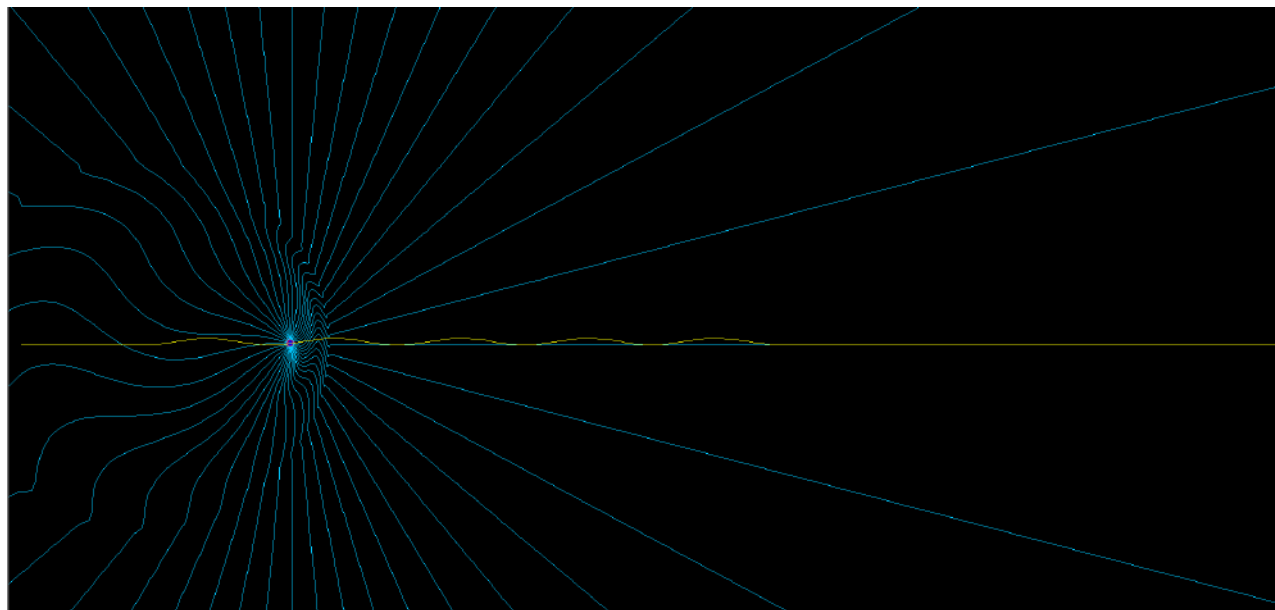
RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: ONDULATORE



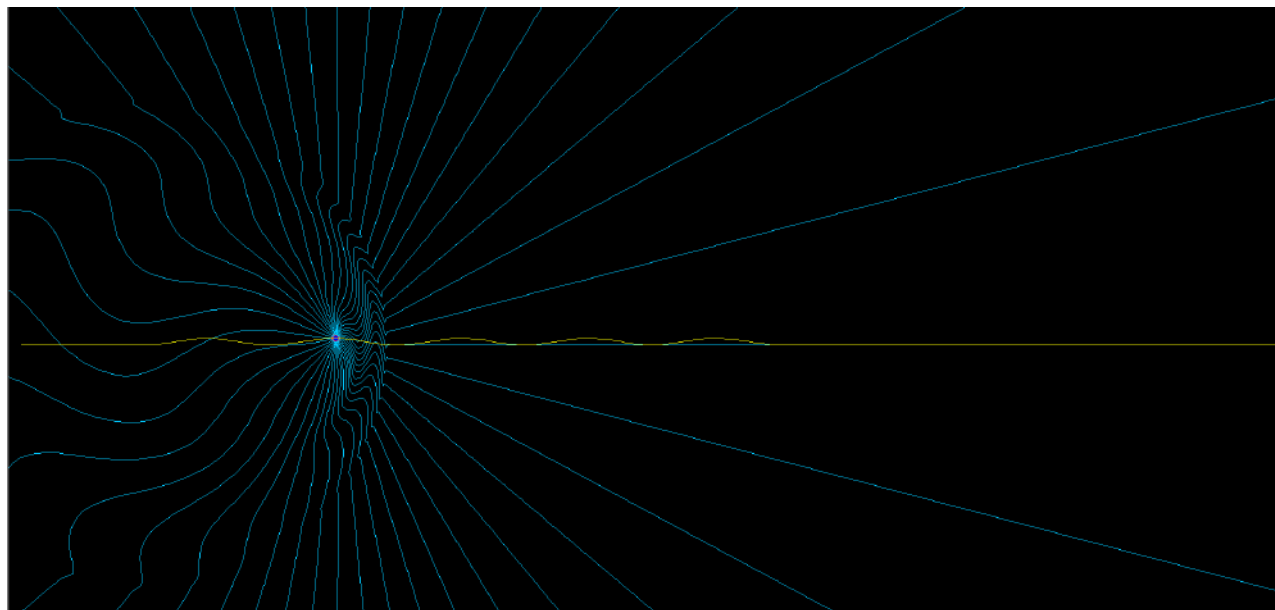
RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: ONDULATORE



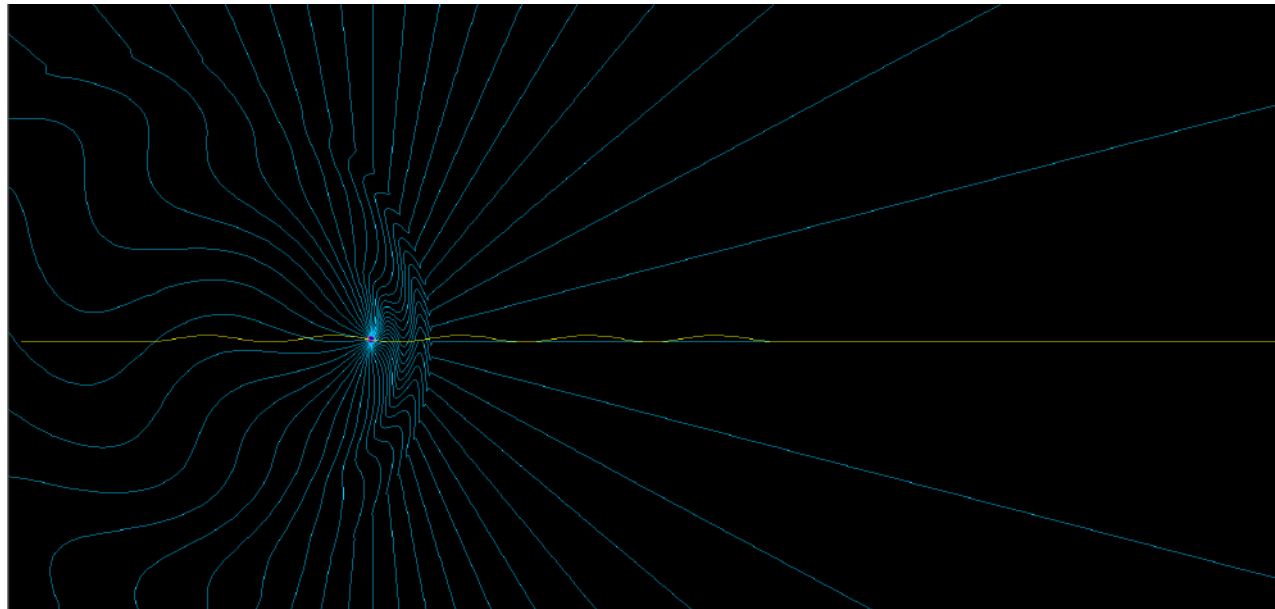
RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: ONDULATORE



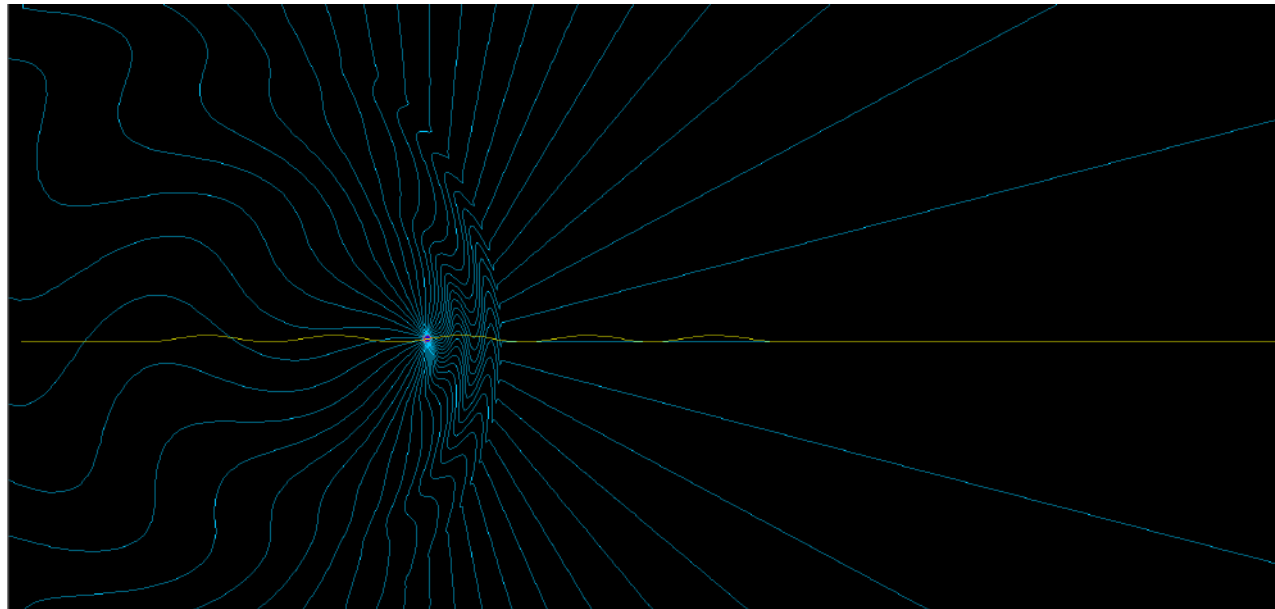
RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: ONDULATORE



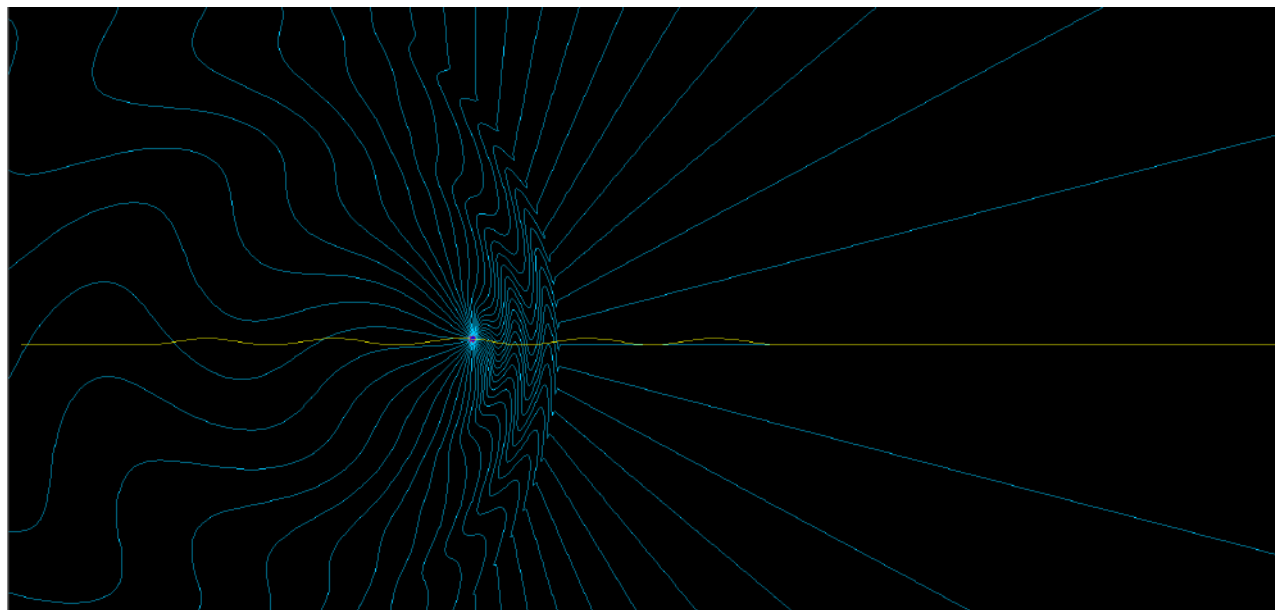
RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: ONDULATORE



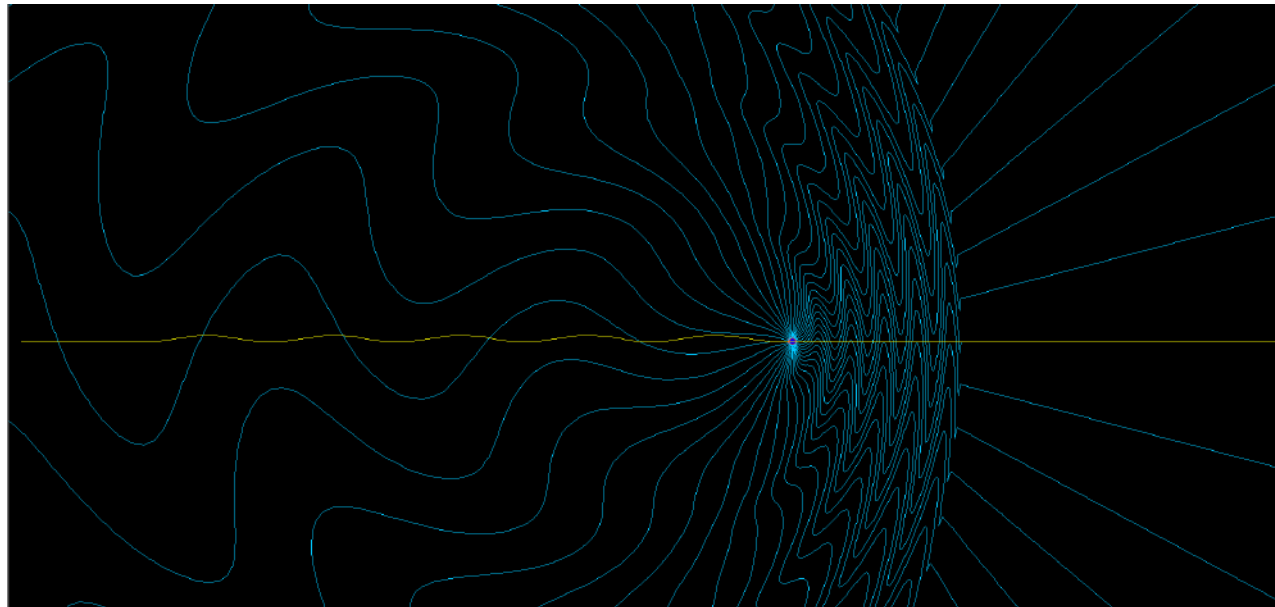
RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: ONDULATORE



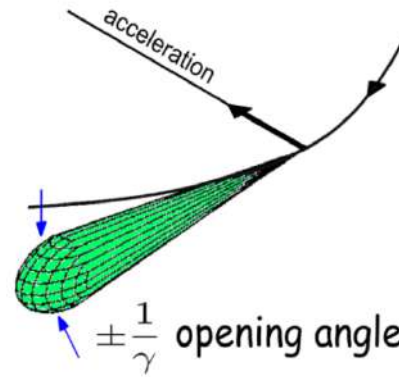
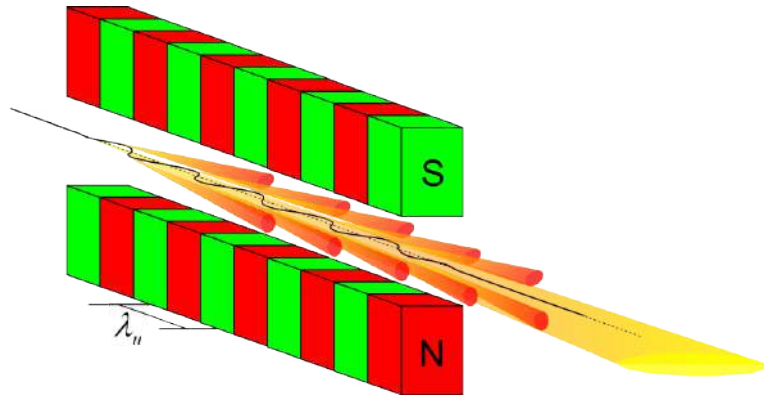
RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: ONDULATORE



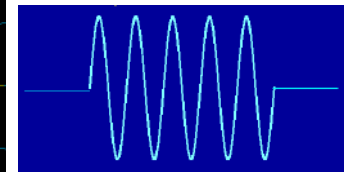
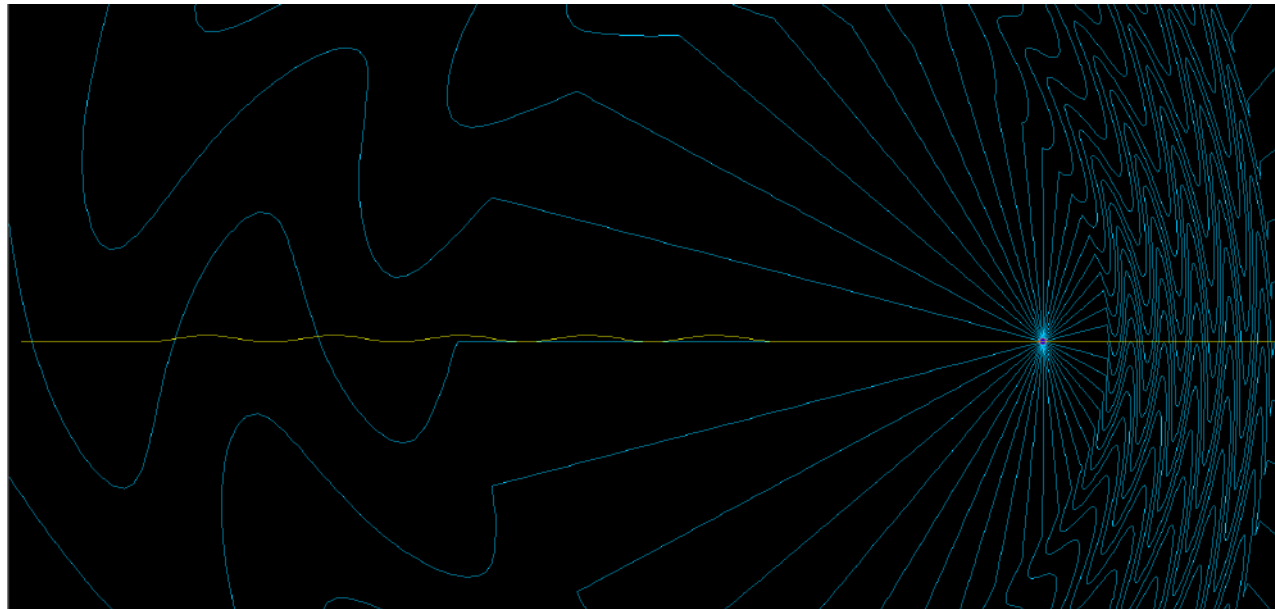
RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: ONDULATORE



RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: ONDULATORE

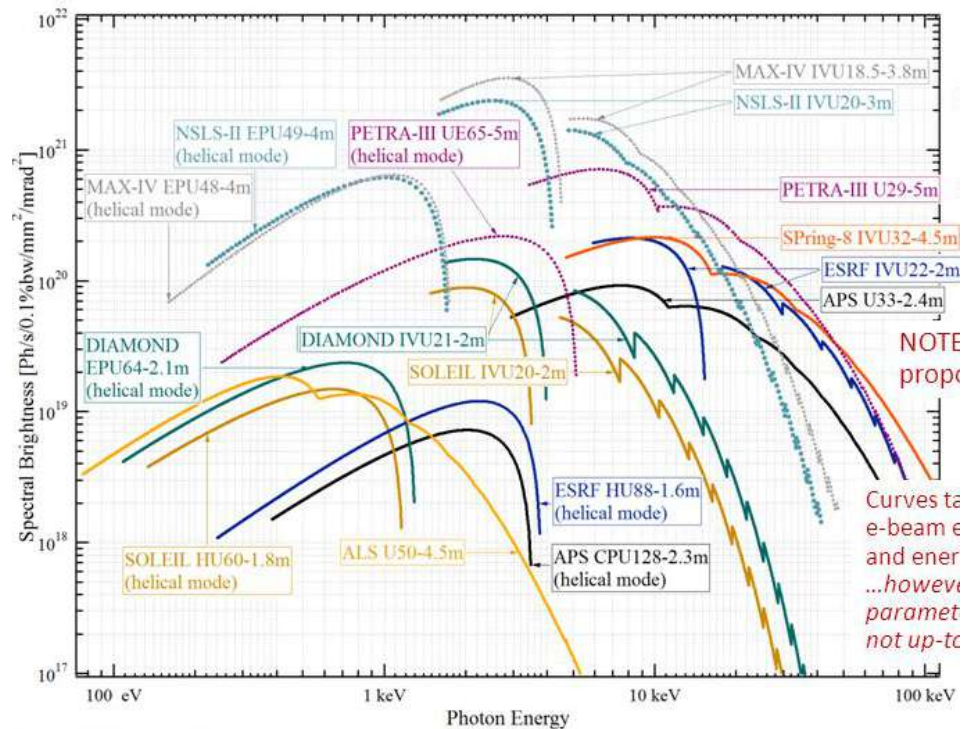
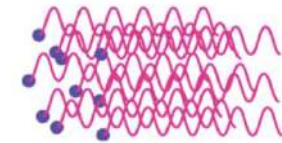
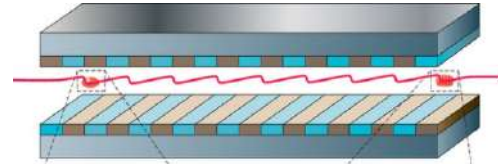


$$L_{pulse} = N_u \lambda_{rad}$$

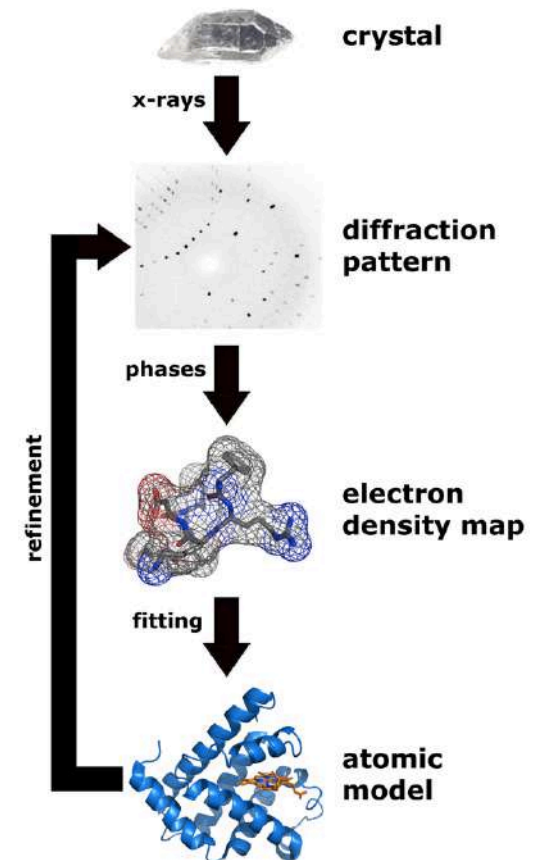
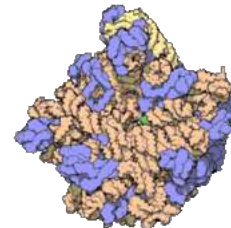


PROPRIETA' DELLA RADIAZIONE DI SINCROTRONE

La radiazione di sincrotrone viene emessa in un **ampio spettro**. La lunghezza d'onda critica identifica il **picco dello spettro** ed è funzione dell'energia degli elettroni (γ^3).



$$\omega_c = \frac{3}{2} \frac{c}{\rho} \gamma^3$$



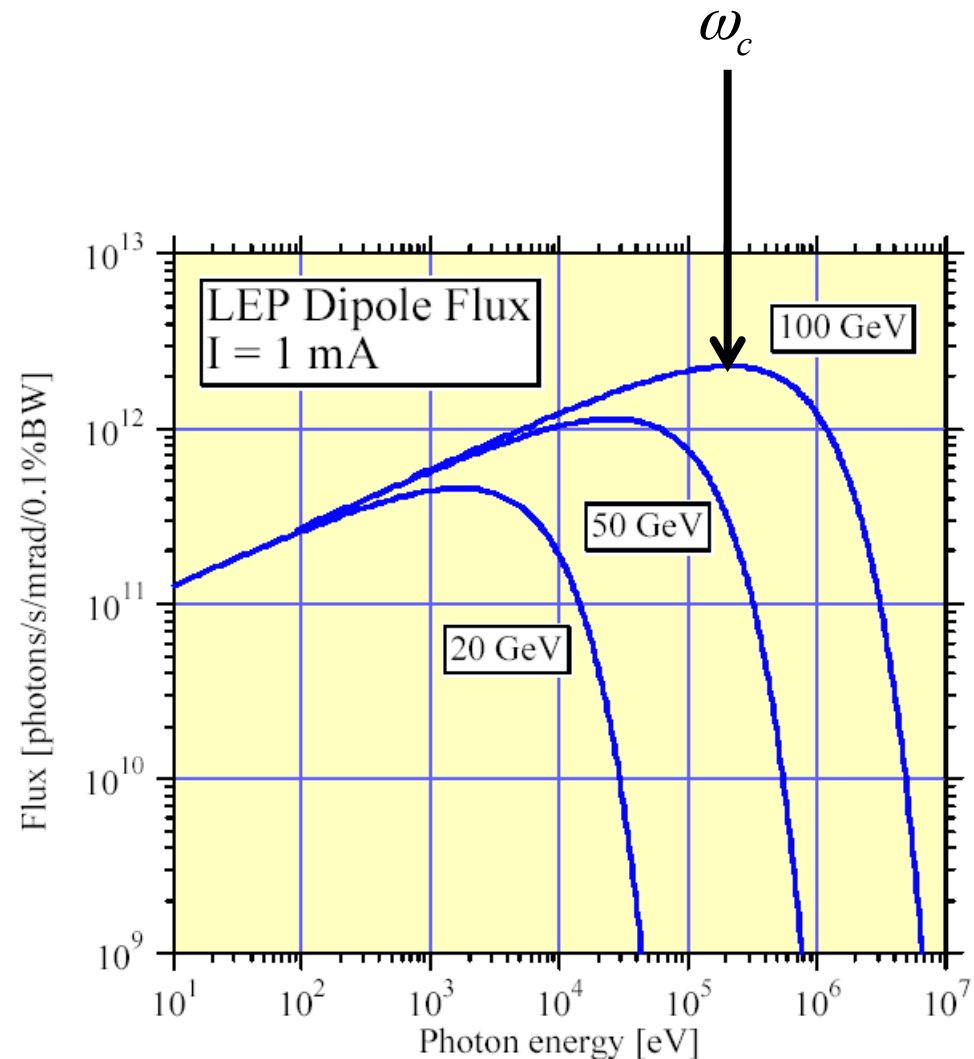
Radiazione di sincrotrone: spettro in frequenza

La radiazione di sincrotrone viene emessa in un **ampio spettro**. La frequenza critica (o viceversa la lunghezza d'onda critica) identifica (circa) il **picco dello spettro** e si calcola come:

$$\omega_c = \frac{3}{2} \frac{c}{\rho} \gamma^3$$

$$\lambda_c = \frac{4}{3} \frac{\pi \rho}{\gamma^3}$$

DAFNE	$\lambda_c \cong 6 \text{ nm}$
GRENOBLE	$\lambda_c \cong 0.2 \text{ nm}$
LEP	$\lambda_c \cong 3 \text{ fm}$





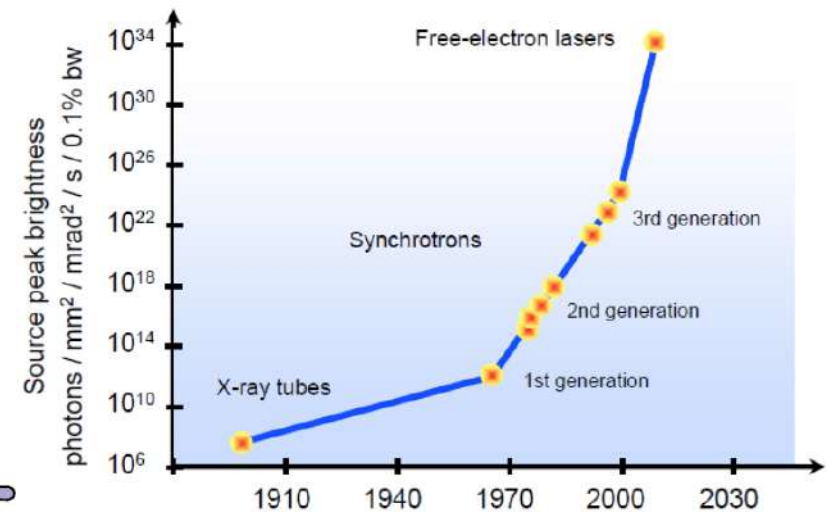
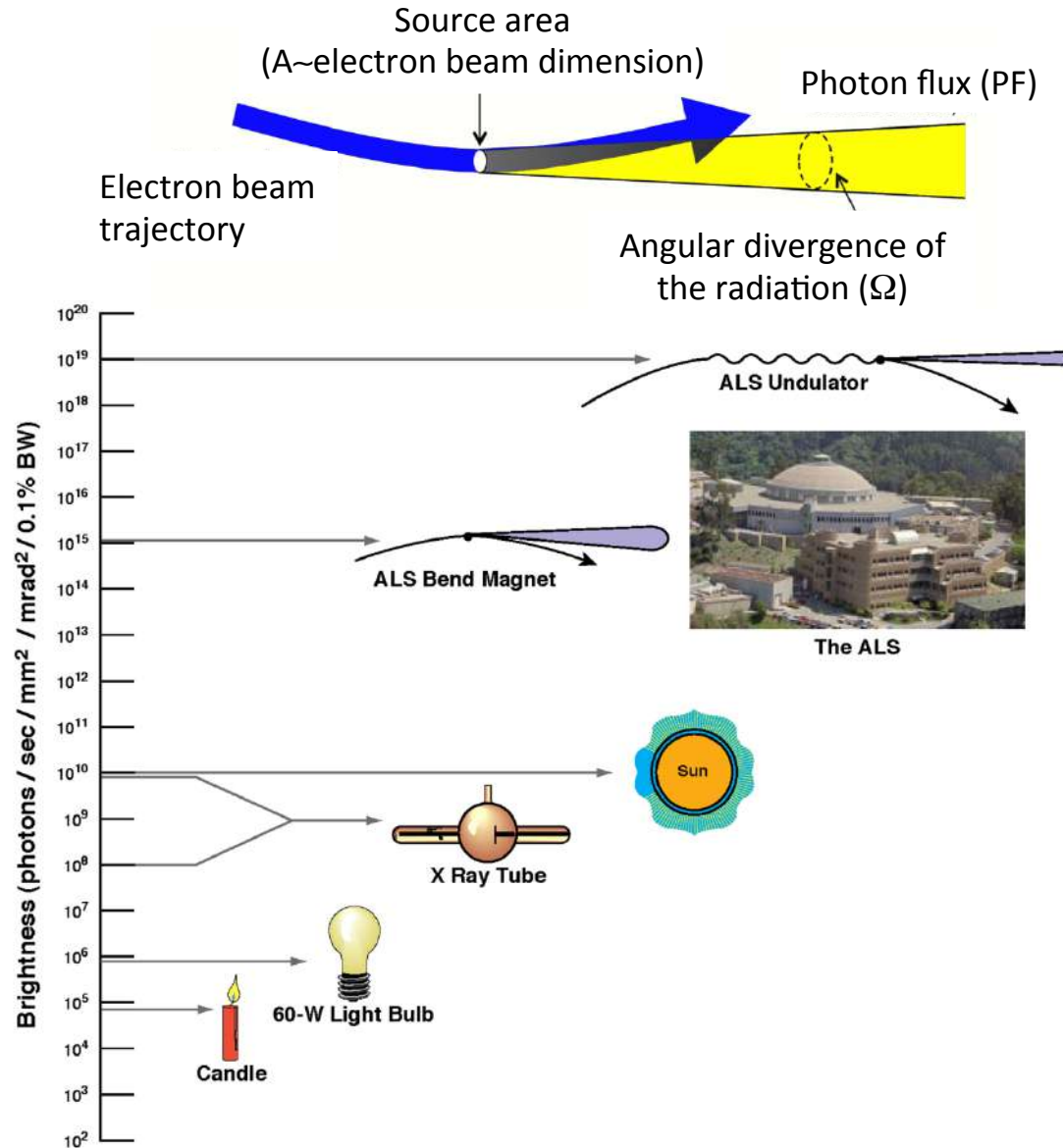
<http://www.isa.au.dk/animations/animations.asp>

SINCROTRONI DEDICATI ALLA “PRODUZIONE” DI LUCE



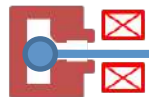
BRIGHTNESS OF A PHOTON SOURCE

The most important parameter for a light source is not (only) the number of emitted photons per second but their “density” called **brightness**.



$$\text{Brightness} = \frac{PF [ph/s]}{A [mm^2] \times \Omega [mrad^2]}$$

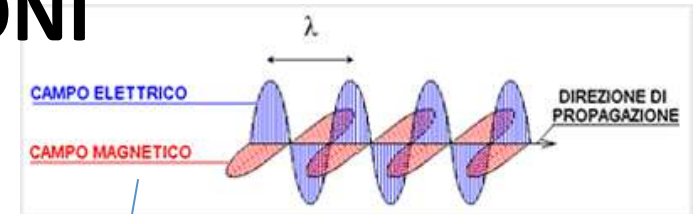
SORGENTI DI RAGGI X E γ BASATE SU COLLISIONI ELETTRONI-FOTONI



Sorgente di
elettroni



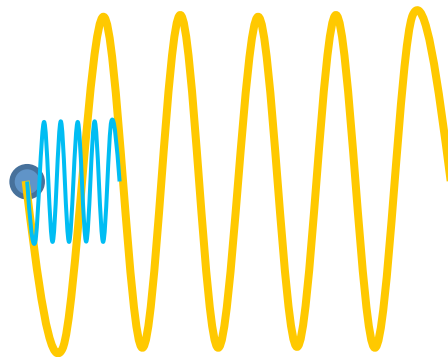
LINAC (100-800 MeV)



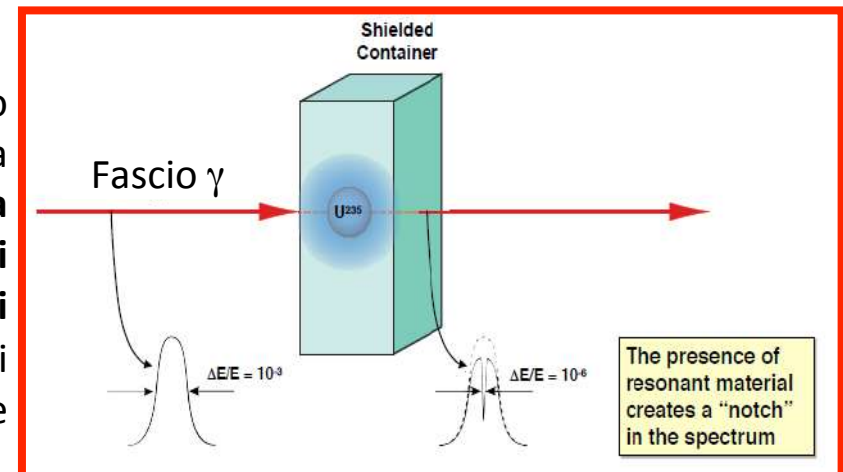
LASER



Il fascio di fotoni emesso
può coprire uno spettro di
radiazione dai raggi X ai
raggi γ

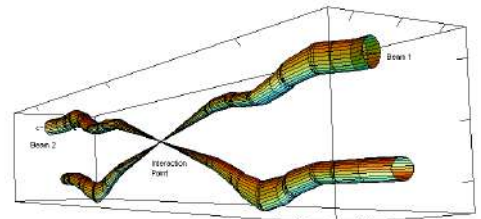
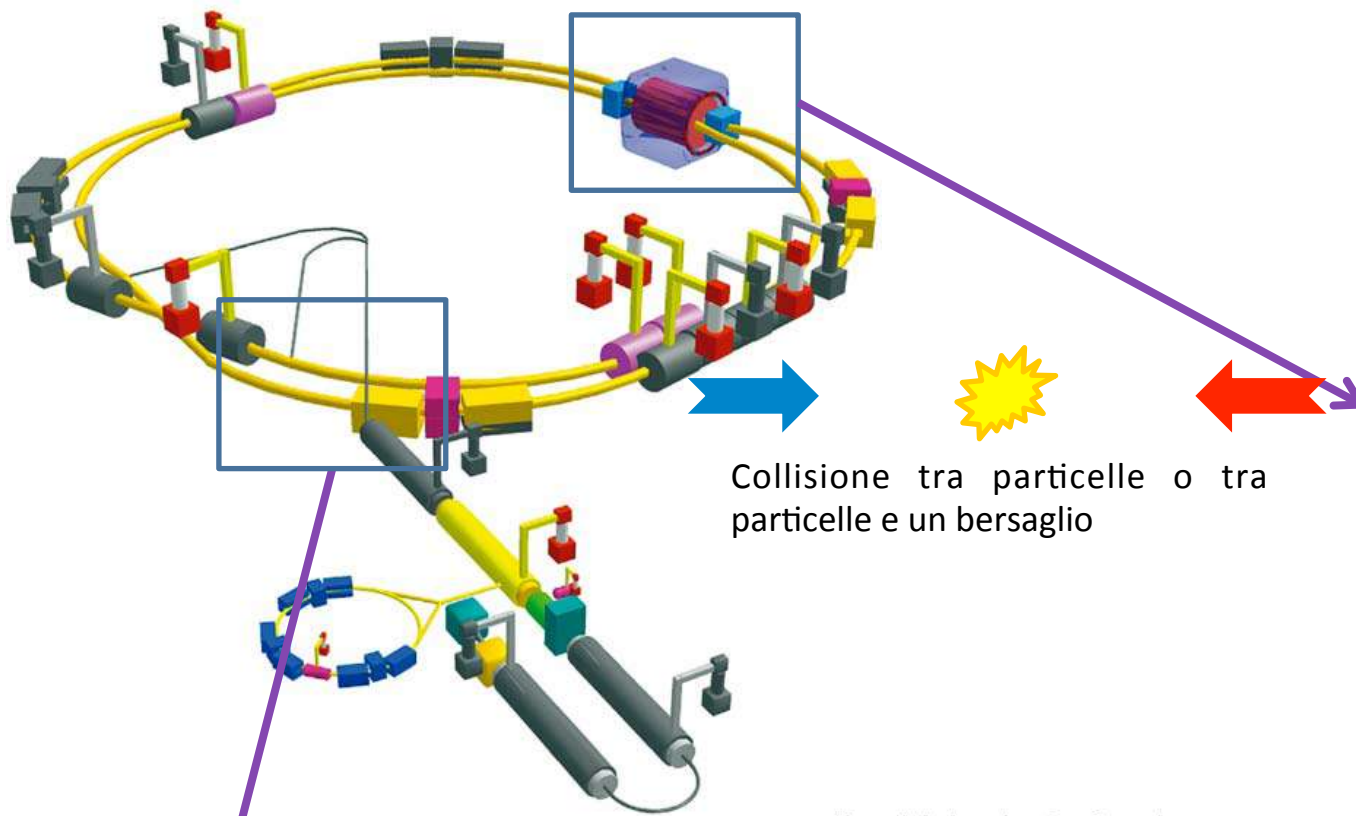


I fasci di raggi γ hanno
una lunghezza d'onda
così piccola che **da
poter interagire con i
nuclei degli atomi**
fornendo informazioni
sulla struttura nucleare
dell'atomo stesso

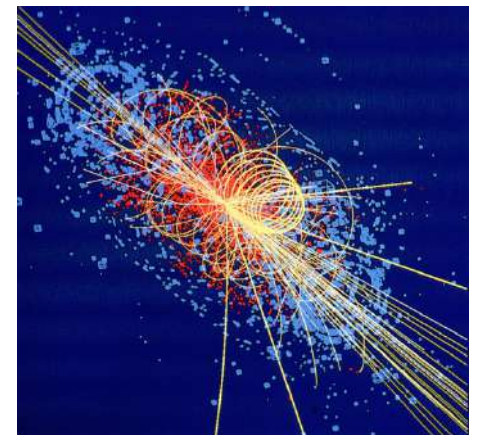
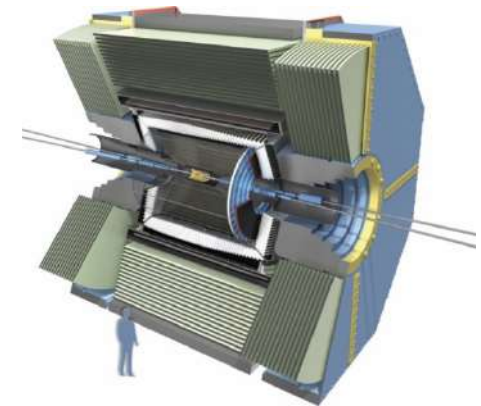


The presence of
resonant material
creates a "notch"
in the spectrum

FISICA FONDAMENTALE: COLLISORI (COLLIDERS)



Relative beam sizes around IP1 (Atlas) in collision



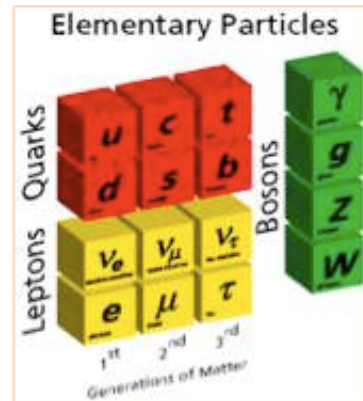
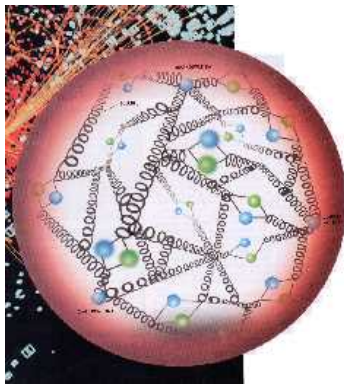
Fermilab Accelerator Complex



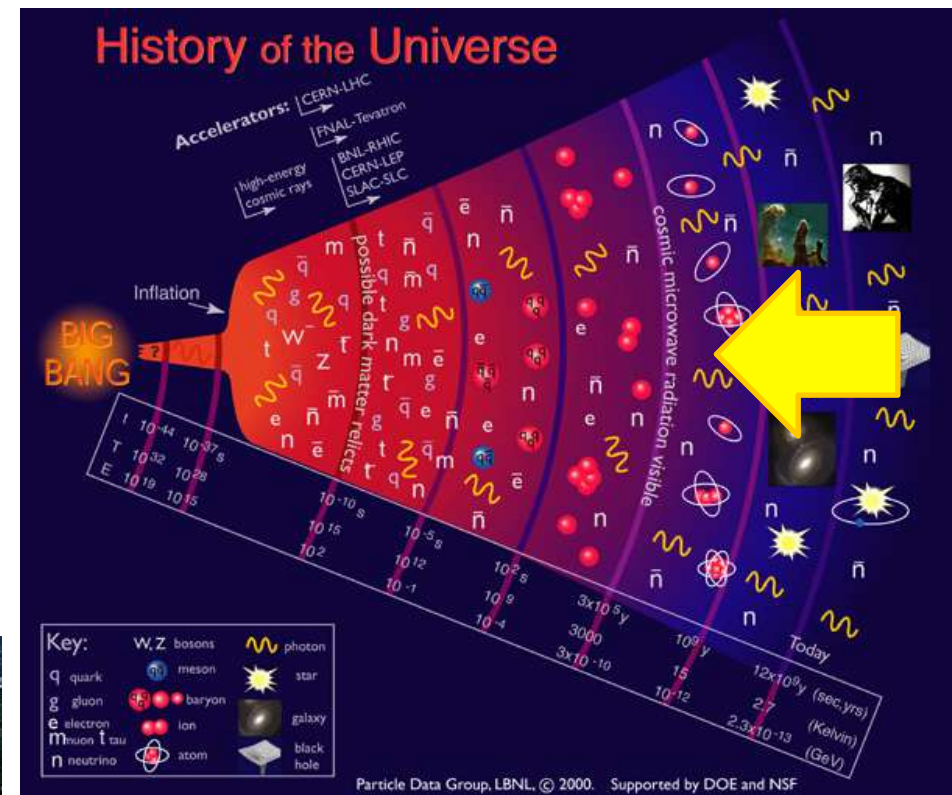
ACCELERATORI DI PARTICELLE: MICROSCOPI SUB-ATOMICI E MACCHINE DEL TEMPO

Le collisione tra due fasci di particelle o tra un fascio di particelle e un bersaglio ...

Forniscono informazioni sui costituenti ultimi del nostro universo e sulle leggi che li governano (**microscopio**)



Ricreando **densità di energia** sempre più elevate, consente di risalire ai primi istanti di vita dell'Universo e di studiarne l'evoluzione (**macchina del tempo**)



COLLISIONI: ENERGIA O DENSITA' DI ENERGIA?

L' eV rappresenta un'energia molto piccola

$$1 \text{ eV} = 1\text{V} \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ C} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ MeV} = 1.6 \times 10^{-13} \text{ J}$$

$$1 \text{ GeV} = 1.6 \times 10^{-10} \text{ J}$$



Un proiettile di piombo da 200 g lanciato a 300 m/s ha un'energia di 9000 J



Ma ogni singolo protone o neutrone del proiettile ha una energia cinetica piccolissima $9000/N_{p+n} \approx 7 \cdot 10^{-23} \text{ J} \approx 0.0005 \text{ eV}$!

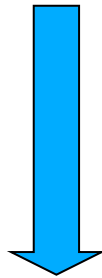


In un **acceleratore come LHC** si raggiungono energie per ogni protone di 7 TeV ($7 \times 10^{12} \text{ eV}$)!

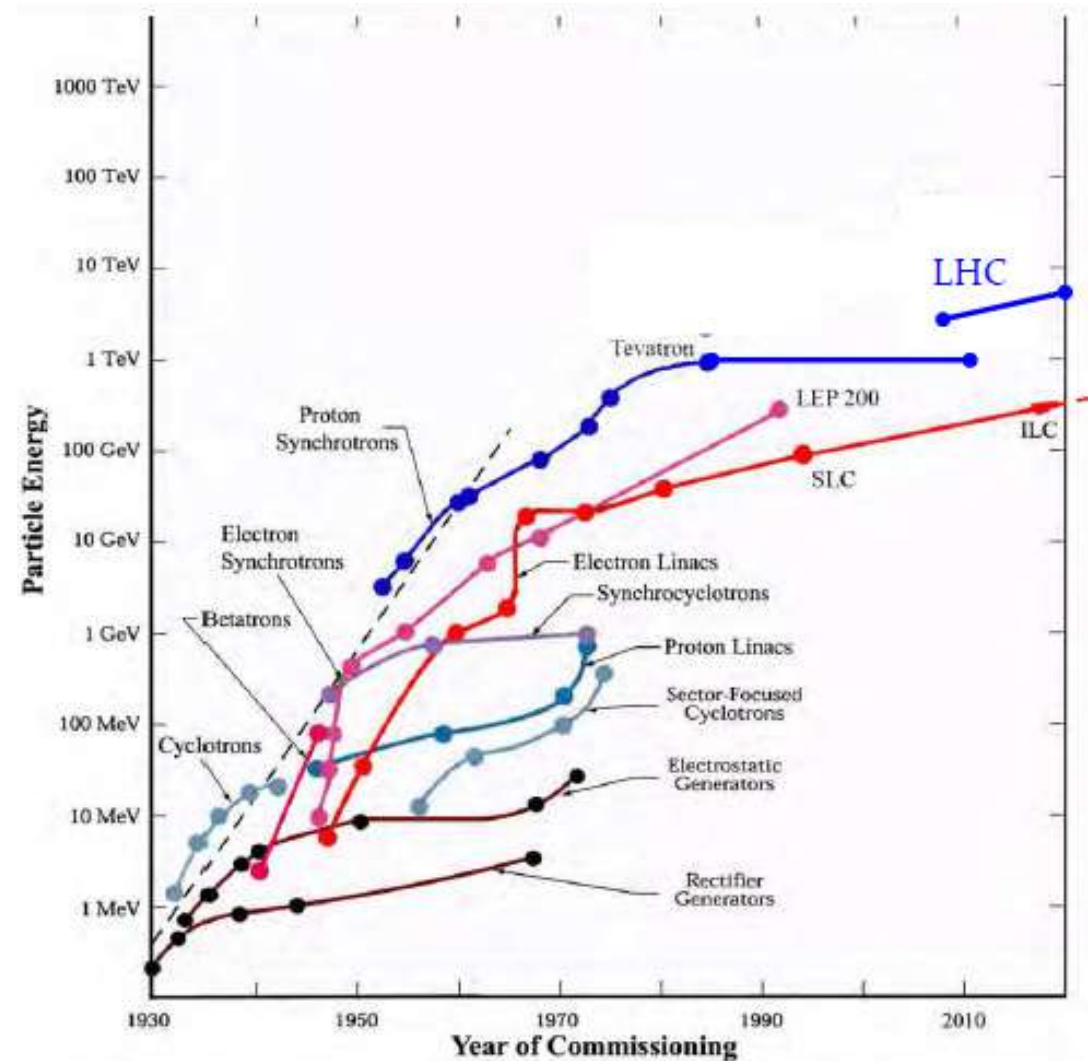
La densità di energia disponibile per le reazioni nucleari o sub-nucleari è enorme!

Sviluppo degli acceleratori di particelle

La capacità di “creare” nuove particelle e di “rompere” i legami nucleari **aumenta con l'energia** e con la quantità di particelle coinvolte nell' interazione.



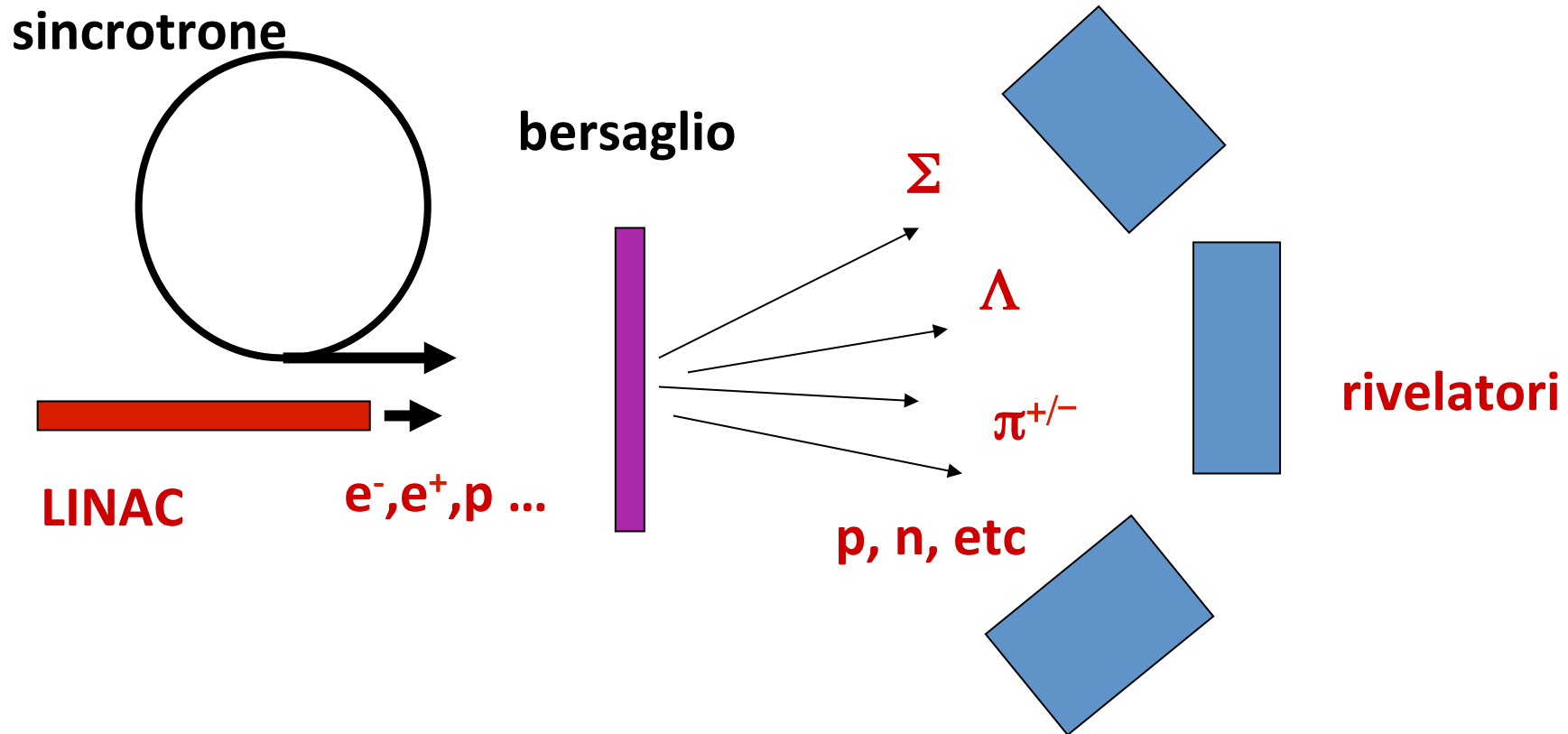
Lo sviluppo degli acceleratori per la fisica delle alte energie è stato determinato dalla necessità di ottenere energie e intensità di fasci sempre maggiori.



Courtesy M. Biagini

L'unità di misura dell'energia delle particelle è l'elettronvolt [eV] $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$

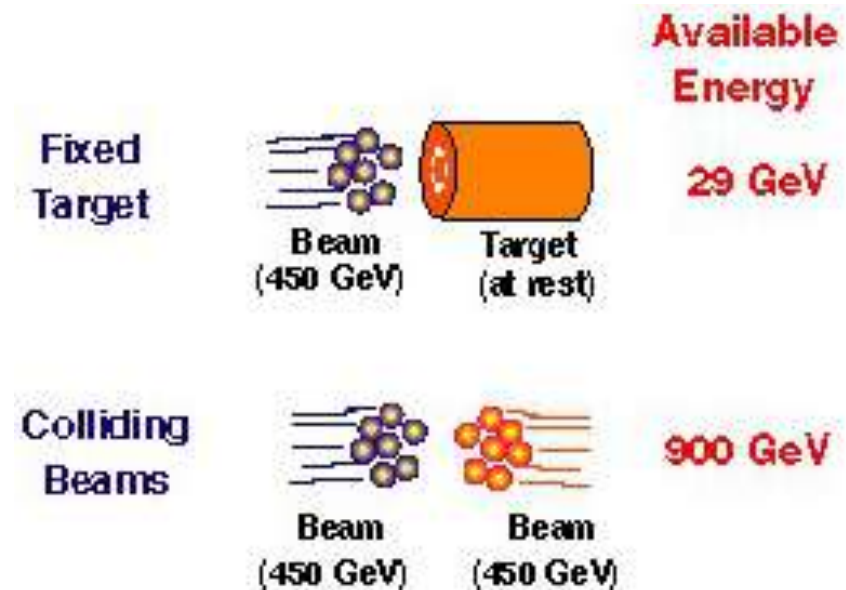
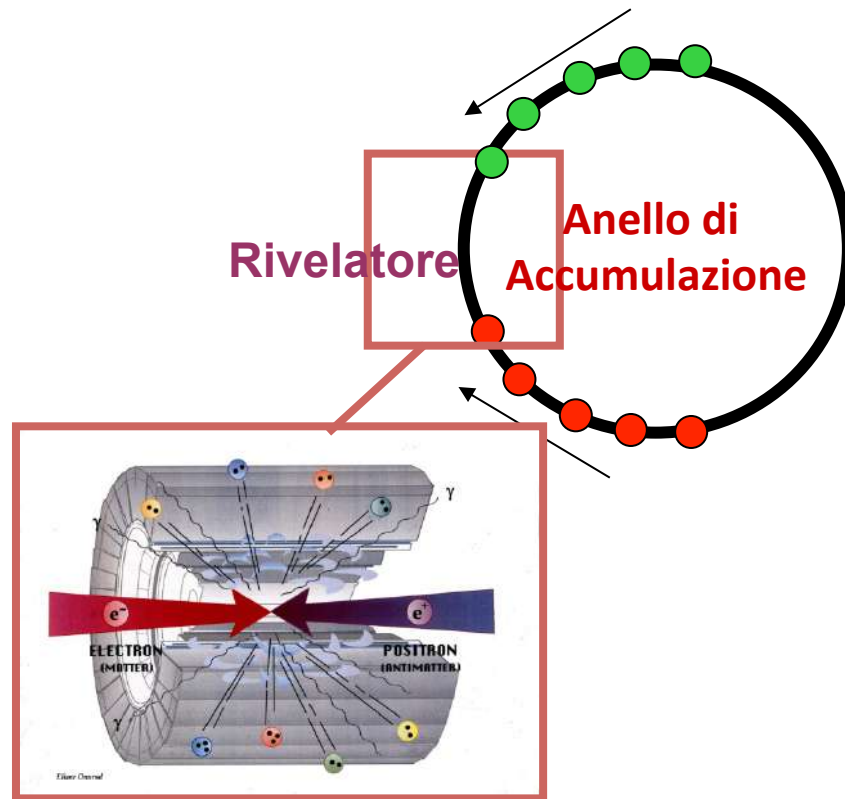
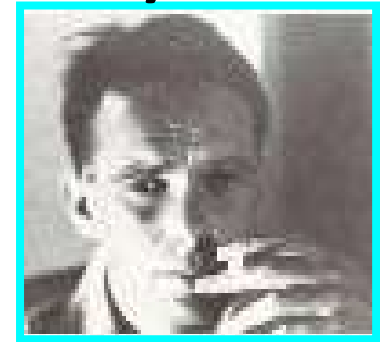
Fisica delle Particelle con Acceleratori: collisioni su targhetta fissa



- 1) La materia è **vuota** : ciò che non ha interagito viene perduto;
- 2) Il bersaglio è **complesso**: molte delle particelle prodotte disturbano l'esperimento;
- 3) Rivelatore "**anisotropo**";
- 4) Parte dell'energia del fascio di particelle **non viene "sfruttata"** nell'interazione in quanto posseduta dal Centro di Massa del sistema in movimento;

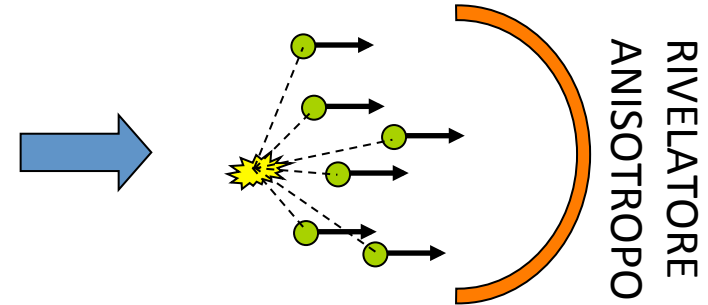
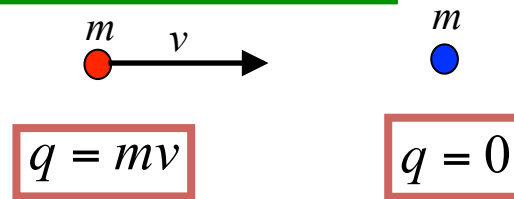
Nascita dei Moderni Collider (Collisori)

La geniale idea di **Bruno Touschek** (1960) fu quella di utilizzare come particelle collidenti, **particelle ed antiparticelle** che, nella loro annichilazione, avrebbero rilasciato **tutta la loro energia** per creare nuove particelle. Inoltre i **prodotti delle collisioni sarebbero stati relativamente "semplici"** rispetto a quelli prodotti dalla collisione contro un bersaglio complesso.



Energia Disponibile nell'interazione

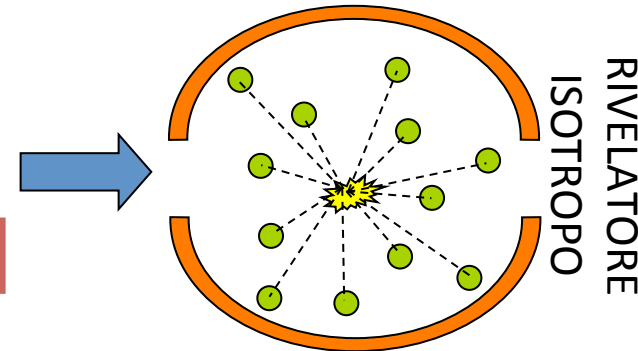
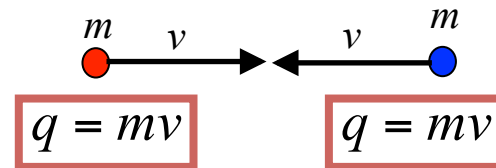
COLLISIONE CONTRO BERSAGLIO FISSO



ENERGIA DISPONIBILE
NELL'INTERAZIONE

$$\sqrt{2Emc^2}$$

COLLISIONE FASCIO-FASCIO



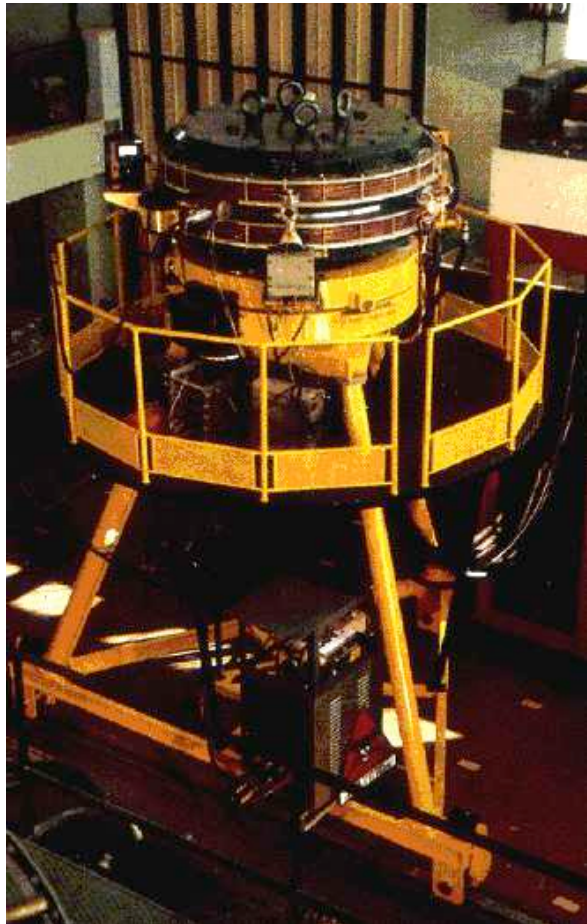
ENERGIA DISPONIBILE
NELL'INTERAZIONE

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

Per contro, la densità dei fasci relativistici che si
sanno realizzare è molto bassa rispetto a quella della
materia condensata di una targhetta.

AdA (Anello di Accumulazione) 1960-1965

AdA è costituito da un magnete a foccheggiamento debole in grado di far circolare particelle (e^+/e^-) con una energia di **250 MeV**.



Length of orbit	408	cm
Radio frequency ($k=2$)	147	MHz
Radio voltage	10	kV
Length of bunches . . .	16.7	cm
Radial width of bunches	.22	cm
Height of bunches (at 10^{-10} mm)	$5.6 \cdot 10^{-4}$	cm
Radiation loss/revolution	580	eV
Lifetime of beam at 10^{-10} mm	250	h

IL NUOVO CIMENTO

The Frascati Storage Ring.

C. BERNARDINI, G. F. CORAZZA, G. GHIGO
Laboratori Nazionali del CNEN - Frascati

R. TOSCHER

Istituto di Fisica dell'Università - Roma
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare - Sezione di Roma

(ricevuto il 7 Novembre 1960)

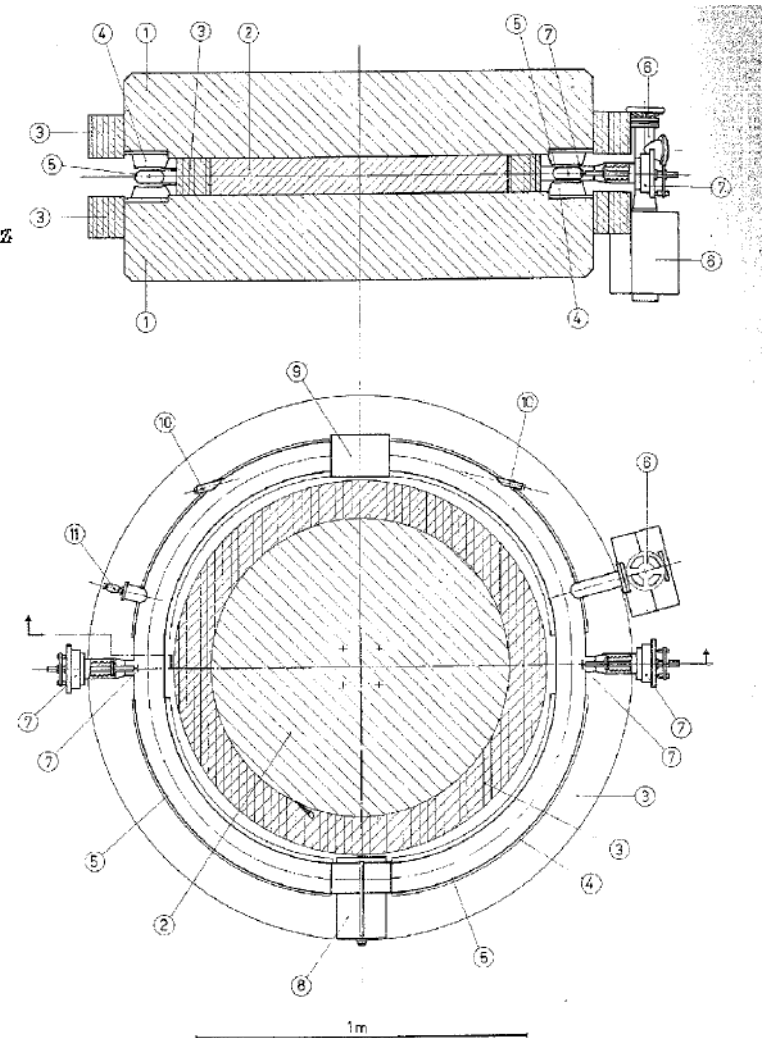
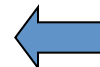
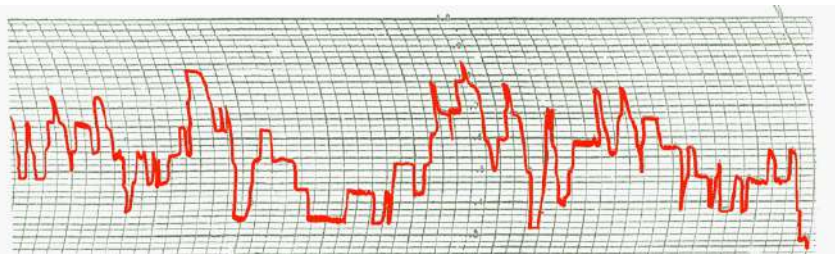


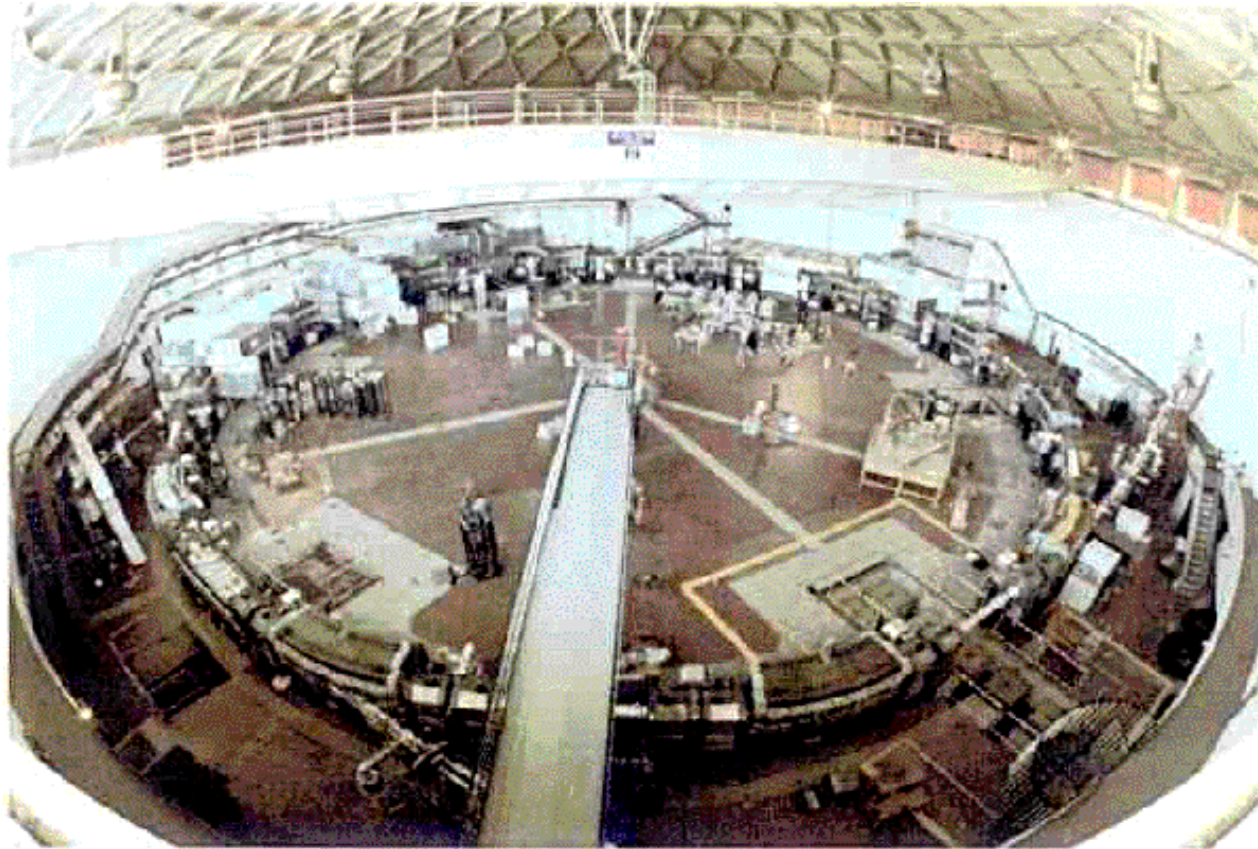
Fig. 1. - Elevation and plan section of the Frascati Storage Ring (anello di accumulazione = AdA): 1) magnet yoke; 2) magnet core; 3) coils; 4) polepieces; 5) doughnut; 6) titanium pump; 7) injection ports; 8) RF cavity; 9) experimental section; 10) windows for the observation of the synchrotron radiation; 11) vacuum gauge.



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

ADONE (1967-1993)

Dal successo di AdA si decise di costruire un anello di accumulazione dello stesso tipo ad una energia più elevata (**1.5 GeV per fascio**, 105 m): **ADONE**

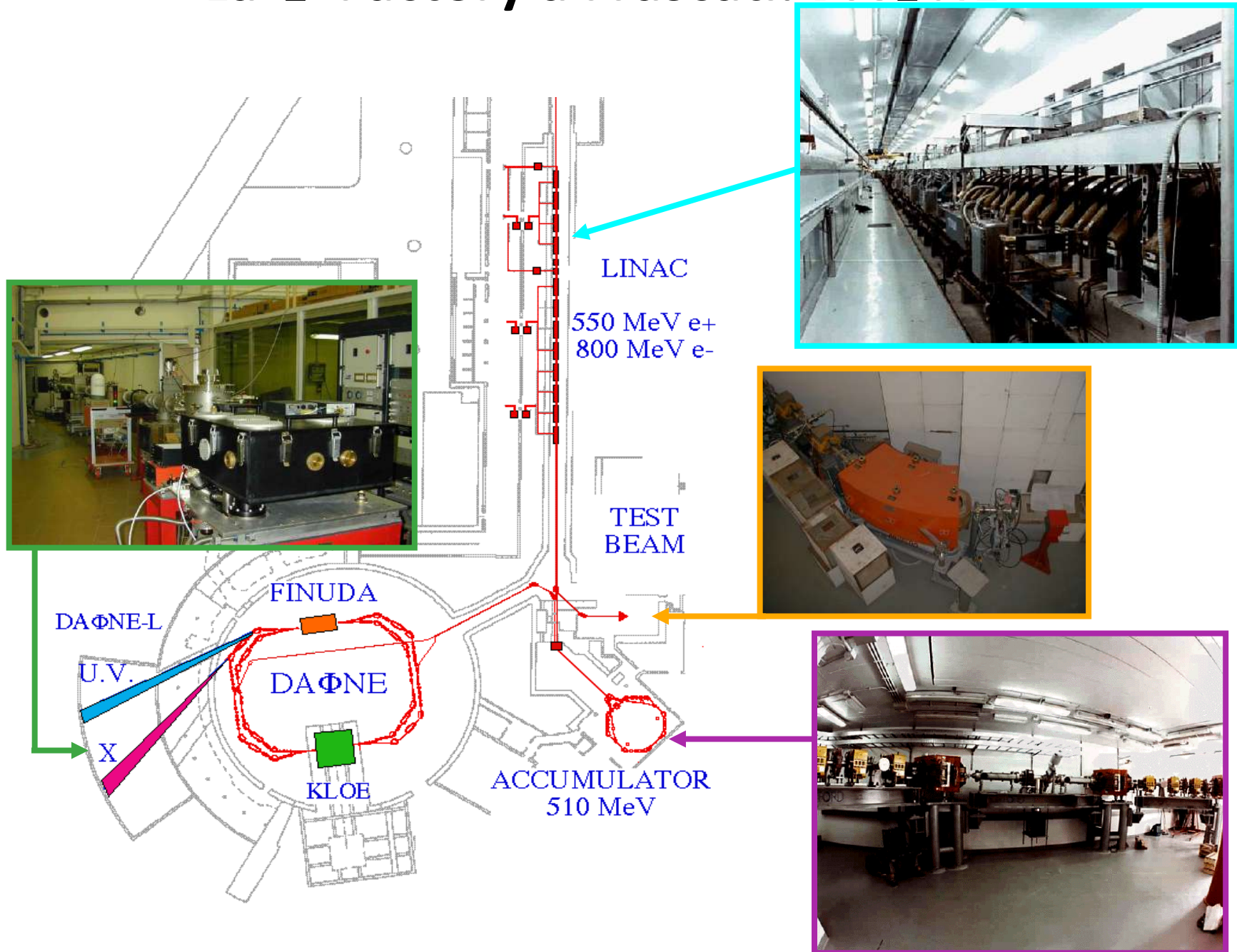


La **costruzione della nuova macchina iniziò nel 1963** e il primo elettrone fu immagazzinato nel 1967. Un LINAC di 350 MeV fu utilizzato come iniettore. La corrente massima circolante in ADONE era di **100 mA in 3 pacchetti**.

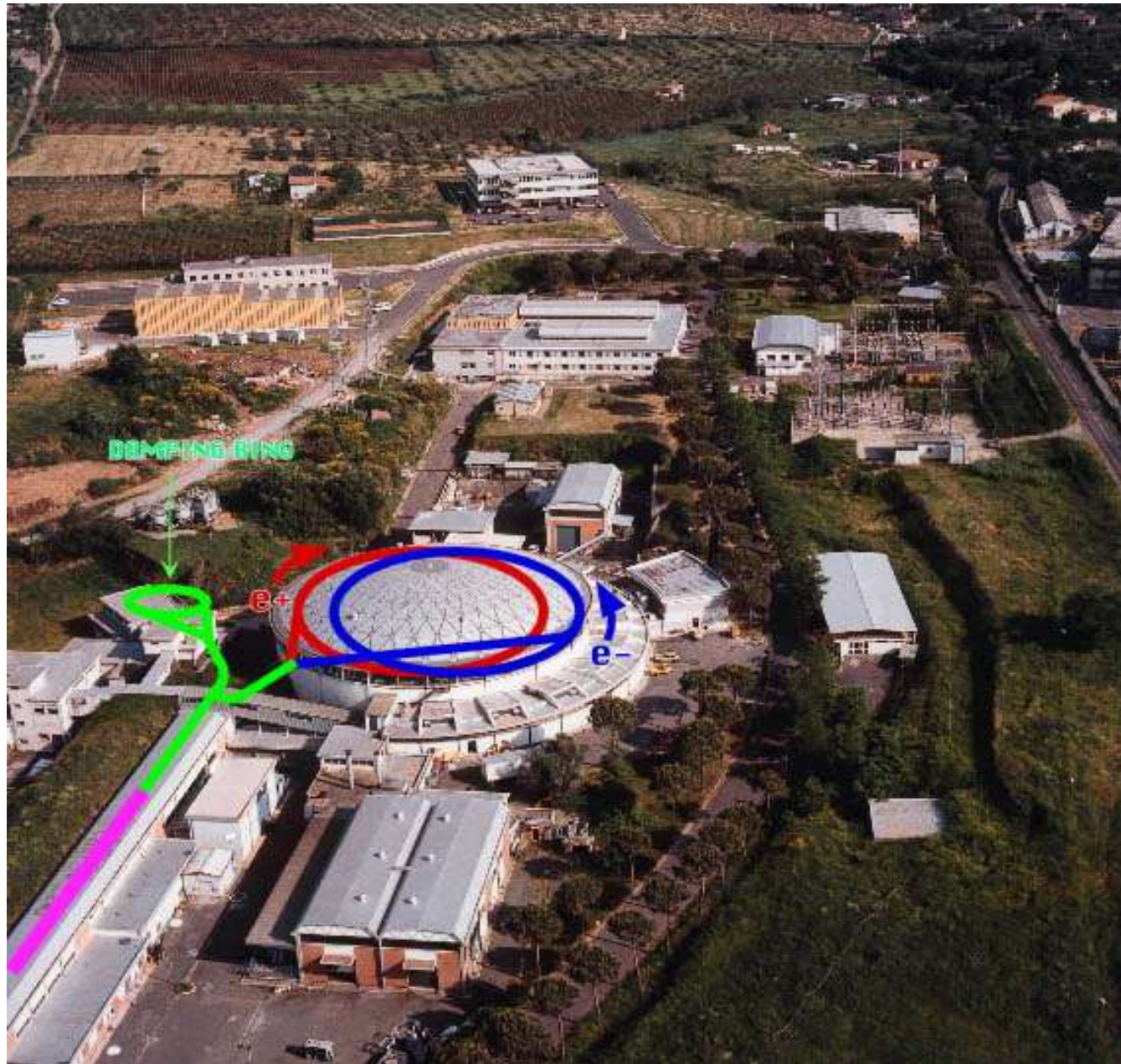
Si raggiunse la luminosità di progetto: $3 \times 10^{29} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

ADONE fu spento il 26 Aprile 1993.

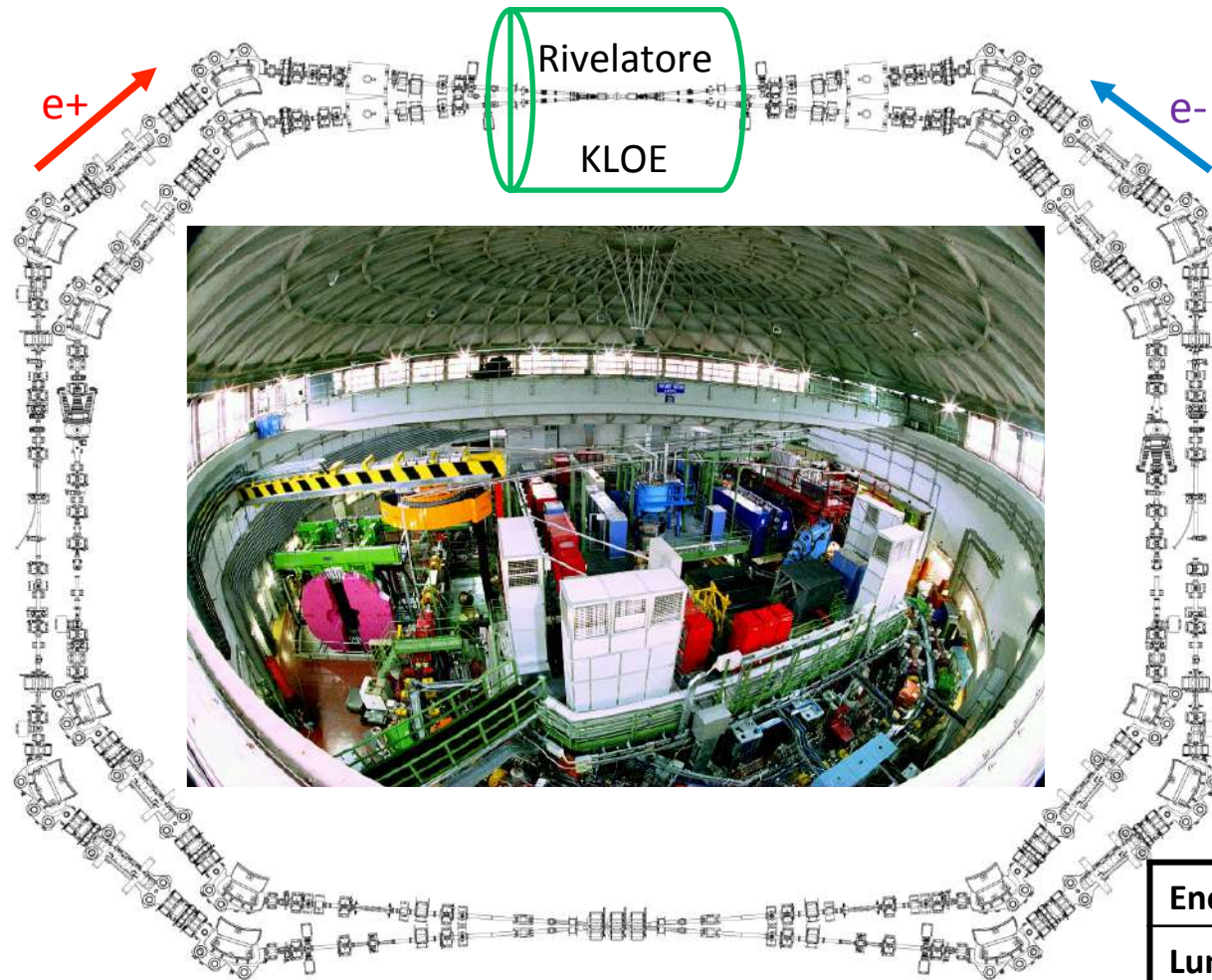
La Φ -Factory a Frascati: DAΦNE



La Φ -Factory a Frascati



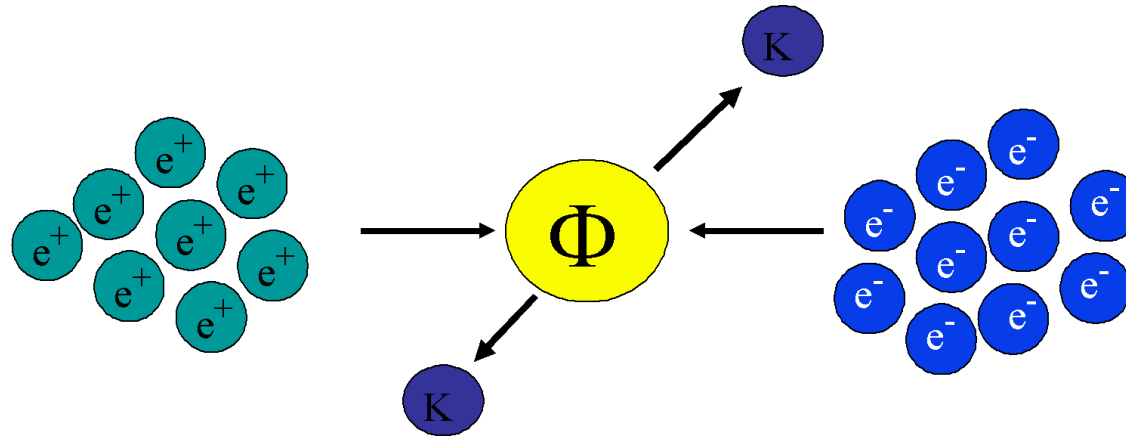
Alcuni parametri di DAΦNE



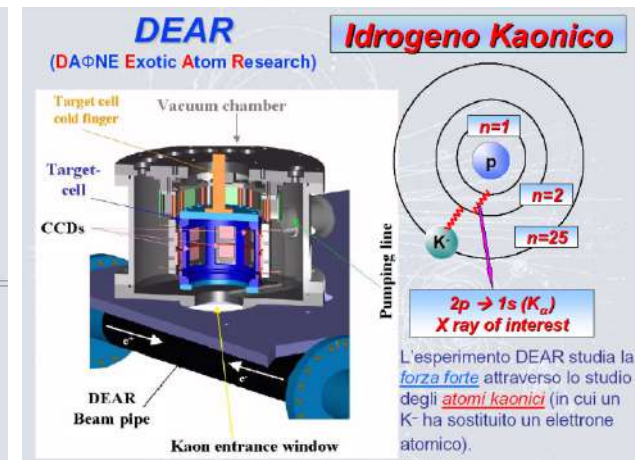
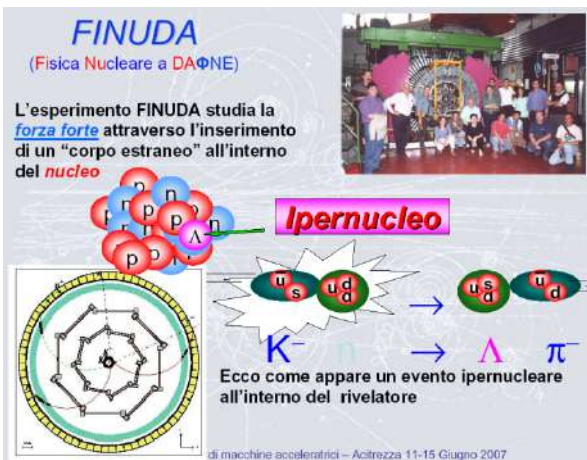
Energia	510 MeV/beam
Lunghezza	96 m
f_{RF}	368 MHz
Numero di pacchetti	120/anello
Lunghezza dei pacchetti	1.5-2.5 cm
I_{MAX}	2.5 A (anello e^-)

Fisica delle Particelle @DAΦNE

Dalla collisione di e^-/e^+ all'energia di 1.02 GeV si produce la particella Φ . Questa decade in kaoni (K) carichi o neutri.



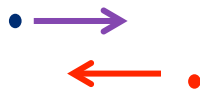
I K sono utilizzati dagli esperimenti KLOE, FINUDA, DEAR e SIDDHARTA



Sezione d'urto e luminosità di un collider

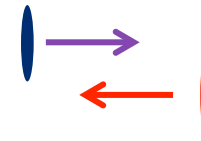
Due particelle (e^+/e^- a DAΦNE ,ad esempio) che collidono possono produrre **tipi diversi di eventi**, alcuni più probabili di altri. La **sezione d'urto** σ di un determinato evento è **proporzionale alla probabilità che l'evento avvenga** e si misura in cm^2 .

Relativamente ad un determinato evento **tutto va come se** le particelle avessero un'"area" finita (misurata in cm^2). L'interazione avviene se le due particelle si "toccano".



Evento poco probabile.

A bassa sezione d'urto



Evento più probabile.

Ad elevata sezione d'urto

Le **sezioni d'urto sono tipicamente molto piccole** infatti l'unità di misura dell'area, per misurare sezioni d'urto tra particelle elementari, è il **barn**.

Dimensionalmente il barn è un'area, ed è pari a: 10^{-28} m^2 ovvero 10^{-24} cm^2

In un collider la frequenza con cui accadono gli eventi cercati si può esprimere come il prodotto $L\sigma$ ove L è detta **luminosità del Collider**.



La luminosità del collider è genericamente definita come l'integrale di sovrapposizione (overlap) tra i due fasci di particelle nelle 4-dimensioni (x, y, z, t). Essa ci fornisce una misura di quante interazioni fascio-fascio stiamo producendo

$$\mathcal{L} = f_c \int \int \int \int_{-\infty}^{+\infty} \rho^+(x, y, s + ct) \rho^-(x, y, s - ct) 2c dt ds dx dy$$

Luminosità di un *collider*

Per fasci gaussiani la luminosità si calcola come:

Numero di particelle per fascio

La luminosità si aumenta aumentando:

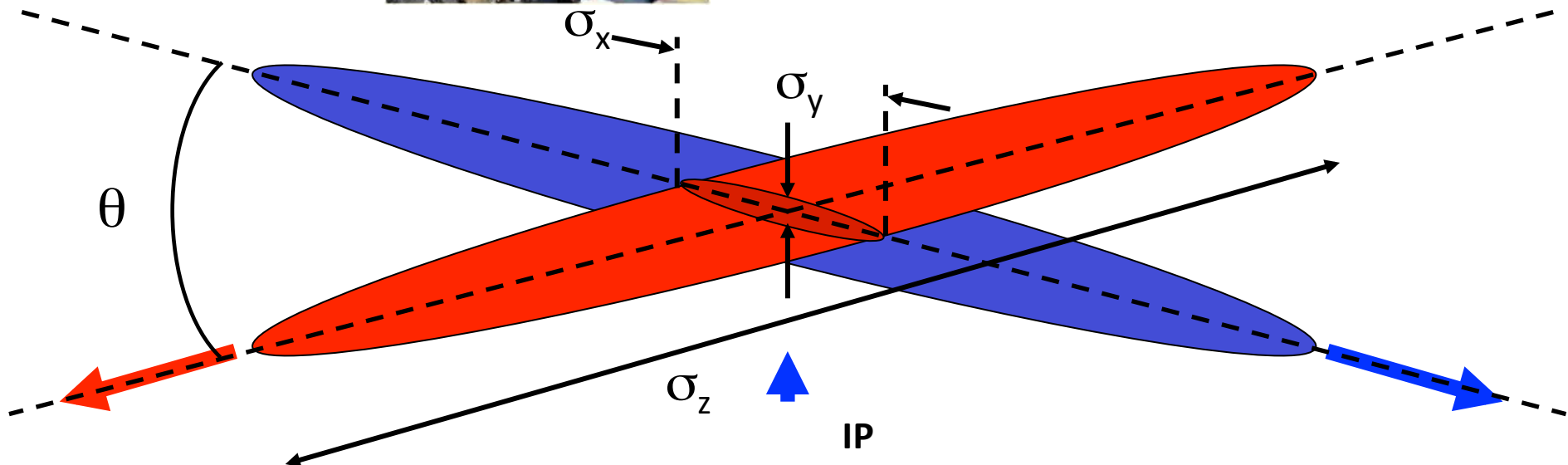
- la densità dei fasci
- frequenza di collisione
- la quantità di particelle collidenti

$$L = \frac{N^{e+} N^{e-}}{4\pi\sigma_x\sigma_y} \times f_{\text{collisione}} \quad [\text{cm}^{-2} \text{sec}^{-1}]$$

L'ottimizzazione della luminosità richiede molto lavoro (sala controllo)



Dimensioni trasverse dei fasci nell'IP:
Si può arrivare a pochi millesimi di mm

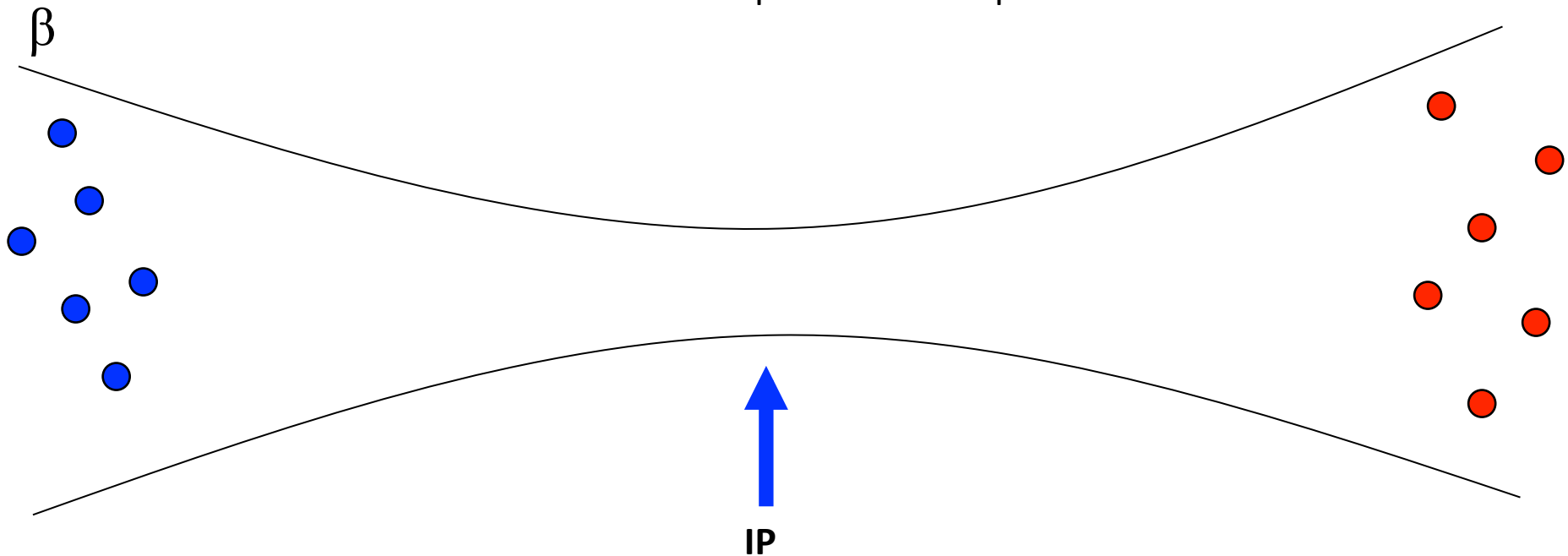


Luminosità di un *collider*

Numero di particelle per fascio

$$L = \frac{N^{e+} N^{e-}}{4\pi\sigma_x \sigma_y} \times f_{\text{collisione}} \quad [cm^{-2} sec^{-1}]$$

Dimensioni trasverse dei fasci nell'IP:
Si può arrivare a pochi millesimi di mm

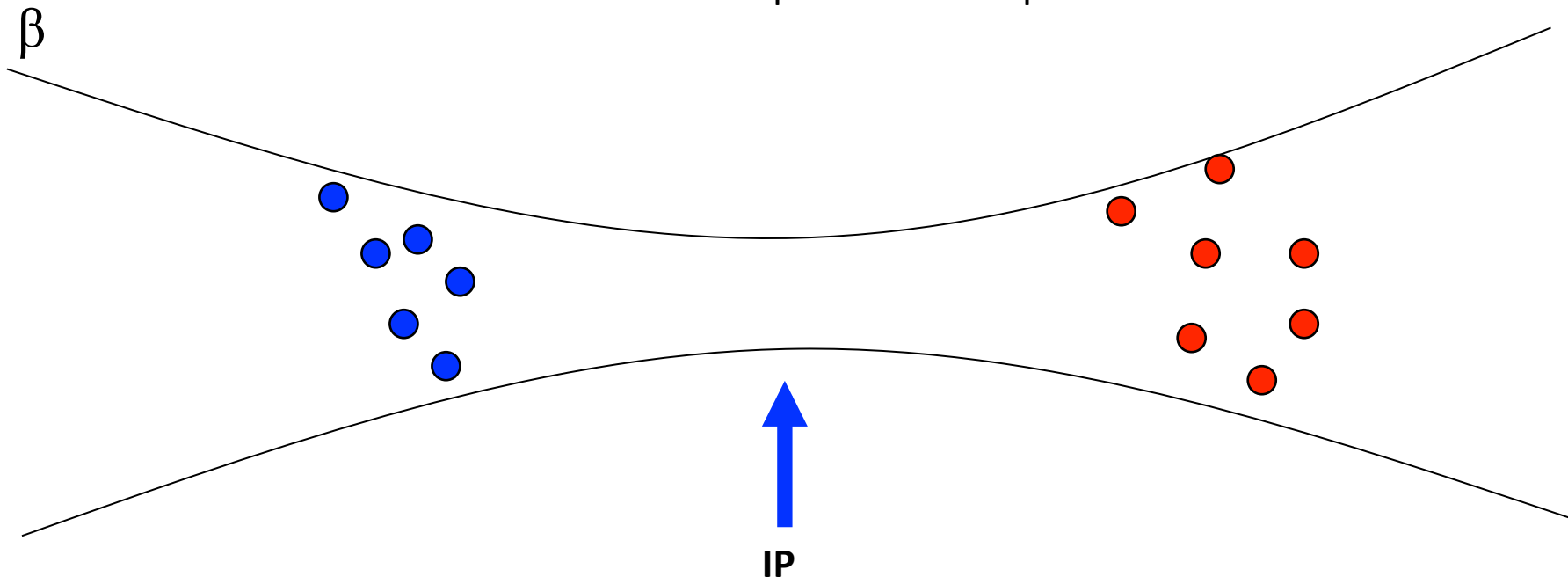


Luminosità di un *collider*

Numero di particelle per fascio

$$L = \frac{N^{e+} N^{e-}}{4\pi\sigma_x \sigma_y} \times f_{\text{collisione}} \quad [cm^{-2} sec^{-1}]$$

Dimensioni trasverse dei fasci nell'IP:
Si può arrivare a pochi millesimi di mm

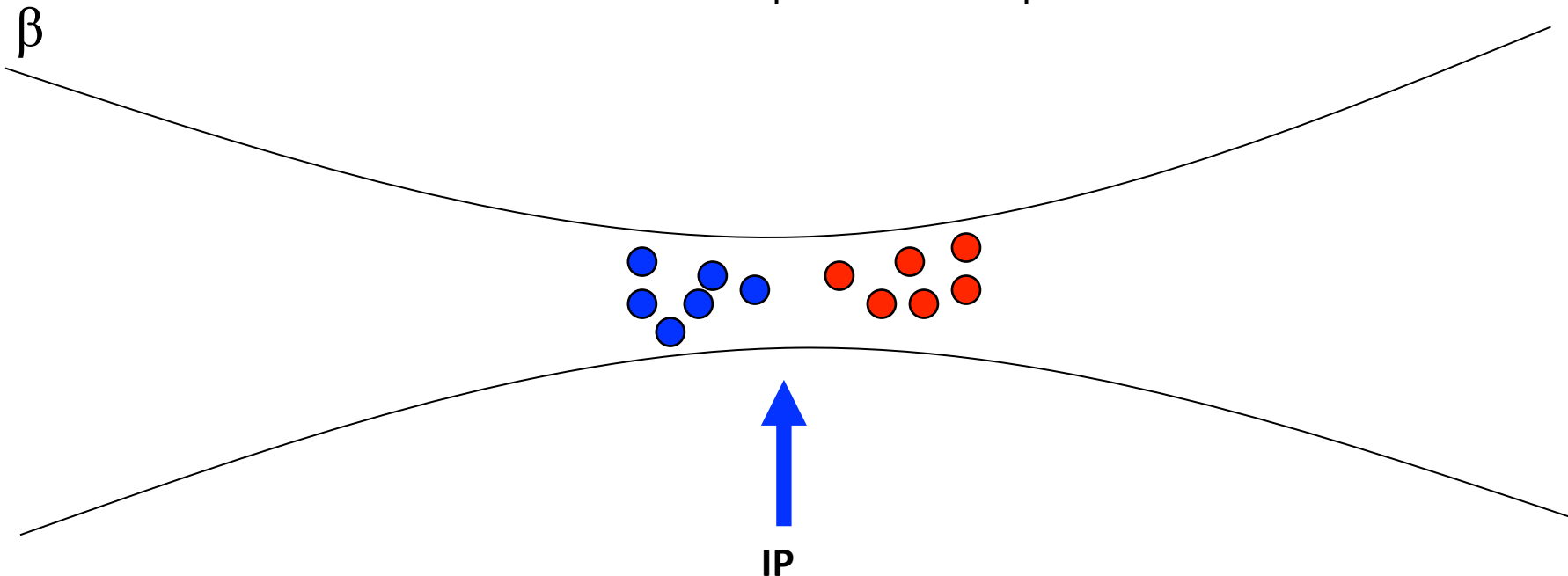


Luminosità di un *collider*

Numero di particelle per fascio

$$L = \frac{N^{e+} N^{e-}}{4\pi\sigma_x \sigma_y} \times f_{\text{collisione}} \quad [cm^{-2} sec^{-1}]$$

Dimensioni trasverse dei fasci nell'IP:
Si può arrivare a pochi millesimi di mm

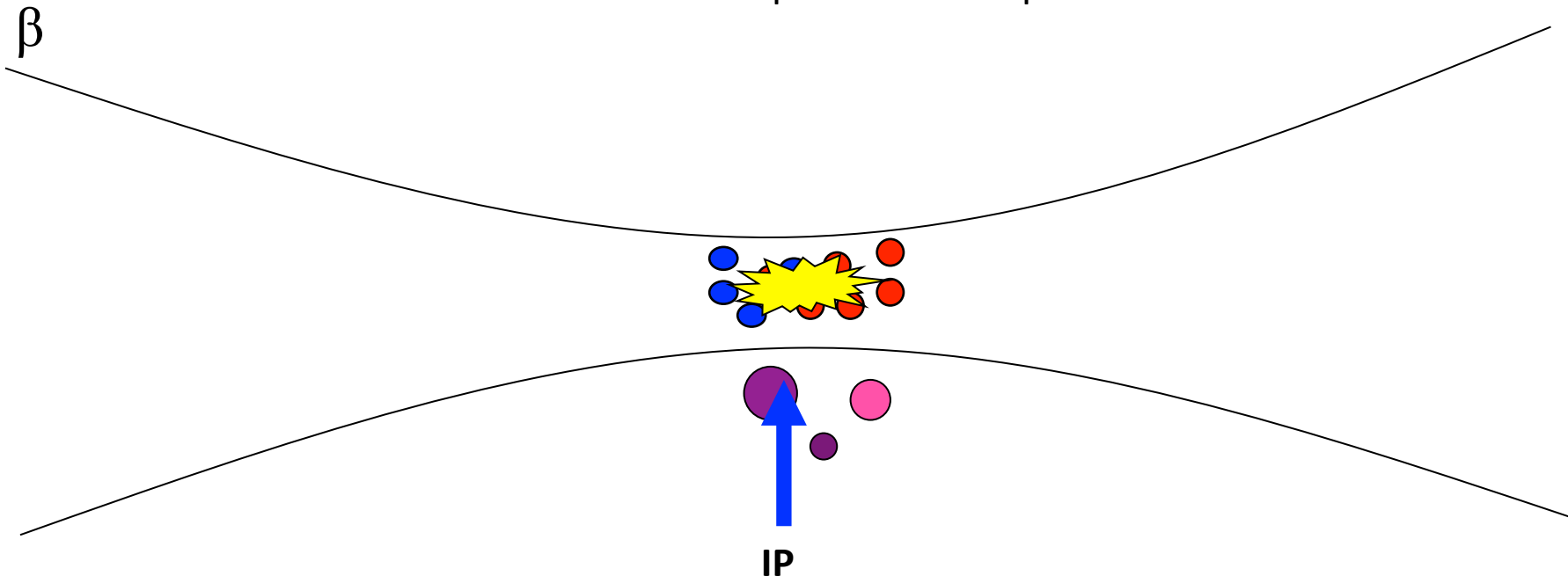


Luminosità di un *collider*

Numero di particelle per fascio

$$L = \frac{N^{e+} N^{e-}}{4\pi\sigma_x \sigma_y} \times f_{\text{collisione}} \quad [cm^{-2} sec^{-1}]$$

Dimensioni trasverse dei fasci nell'IP:
Si può arrivare a pochi millesimi di mm

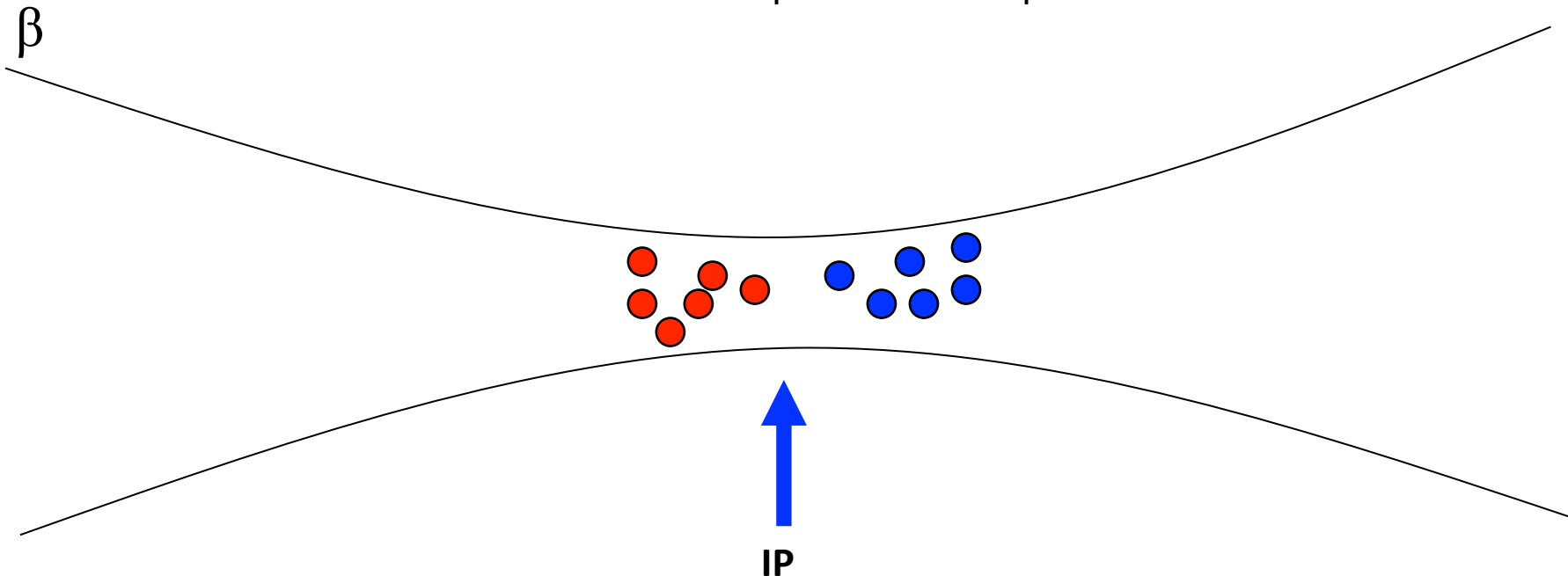


Luminosità di un *collider*

Numero di particelle per fascio

$$L = \frac{N^{e+} N^{e-}}{4\pi\sigma_x \sigma_y} \times f_{\text{collisione}} \quad [cm^{-2} sec^{-1}]$$

Dimensioni trasverse dei fasci nell'IP:
Si può arrivare a pochi millesimi di mm

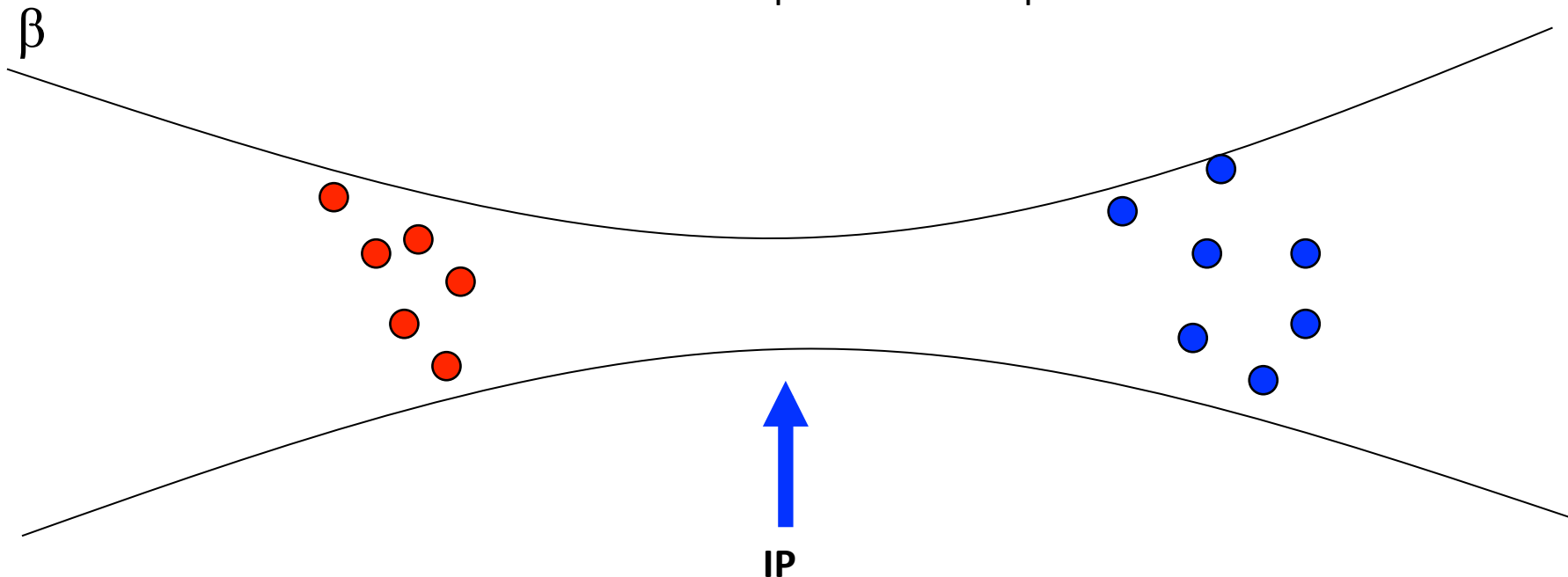


Luminosità di un *collider*

Numero di particelle per fascio

$$L = \frac{N^{e+} N^{e-}}{4\pi\sigma_x \sigma_y} \times f_{\text{collisione}} \quad [cm^{-2} sec^{-1}]$$

Dimensioni trasverse dei fasci nell'IP:
Si può arrivare a pochi millesimi di mm

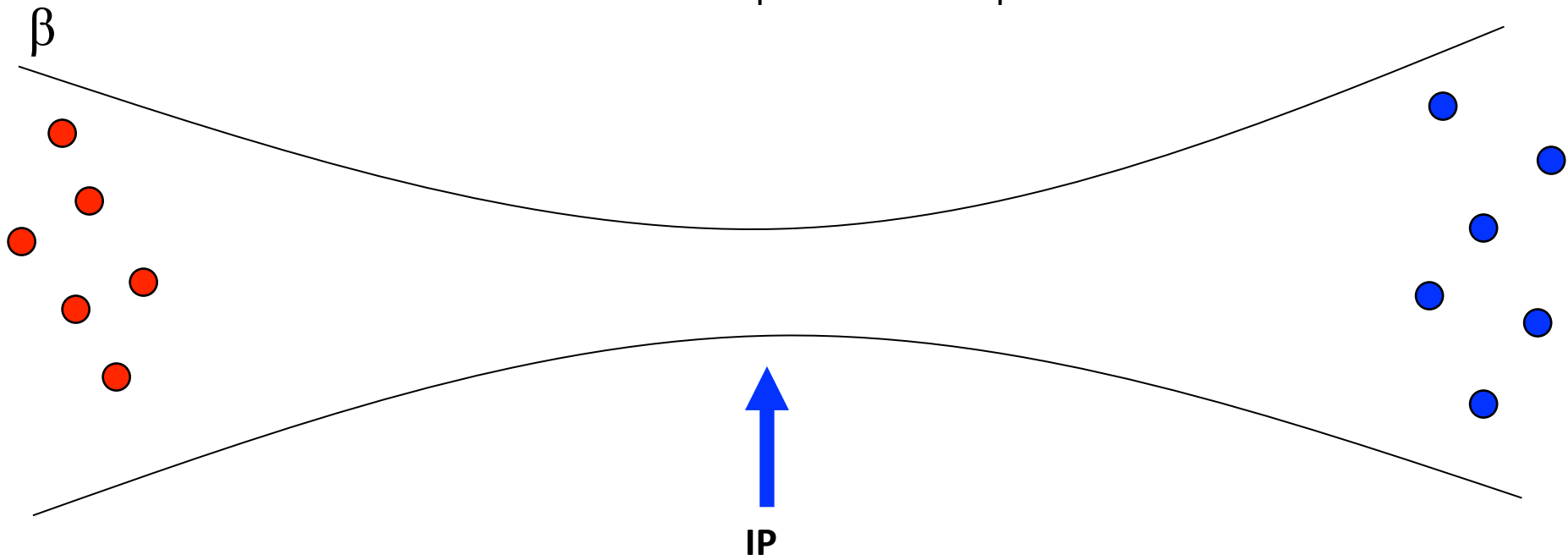


Luminosità di un *collider*

Numero di particelle per fascio

$$L = \frac{N^{e+} N^{e-}}{4\pi\sigma_x \sigma_y} \times f_{\text{collisione}} \quad [cm^{-2} sec^{-1}]$$

Dimensioni trasverse dei fasci nell'IP:
Si può arrivare a pochi millesimi di mm



Luminosità di un *collider*: esempio calcolo per DAΦNE

Produzione di Φ a DAΦNE

$$L = \frac{N^{e+} N^{e-}}{4\pi\sigma_x \sigma_y} \times f_{\text{collisione}} \cong 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

$\sim 2 \cdot 10^{10}$ (pointing to N^{e+} and N^{e-})

$f_{\text{RF}} = 368.000.000 \text{ s}^{-1}$ (120 pacchetti) (pointing to $f_{\text{collisione}}$)

1 mm (pointing to σ_x)

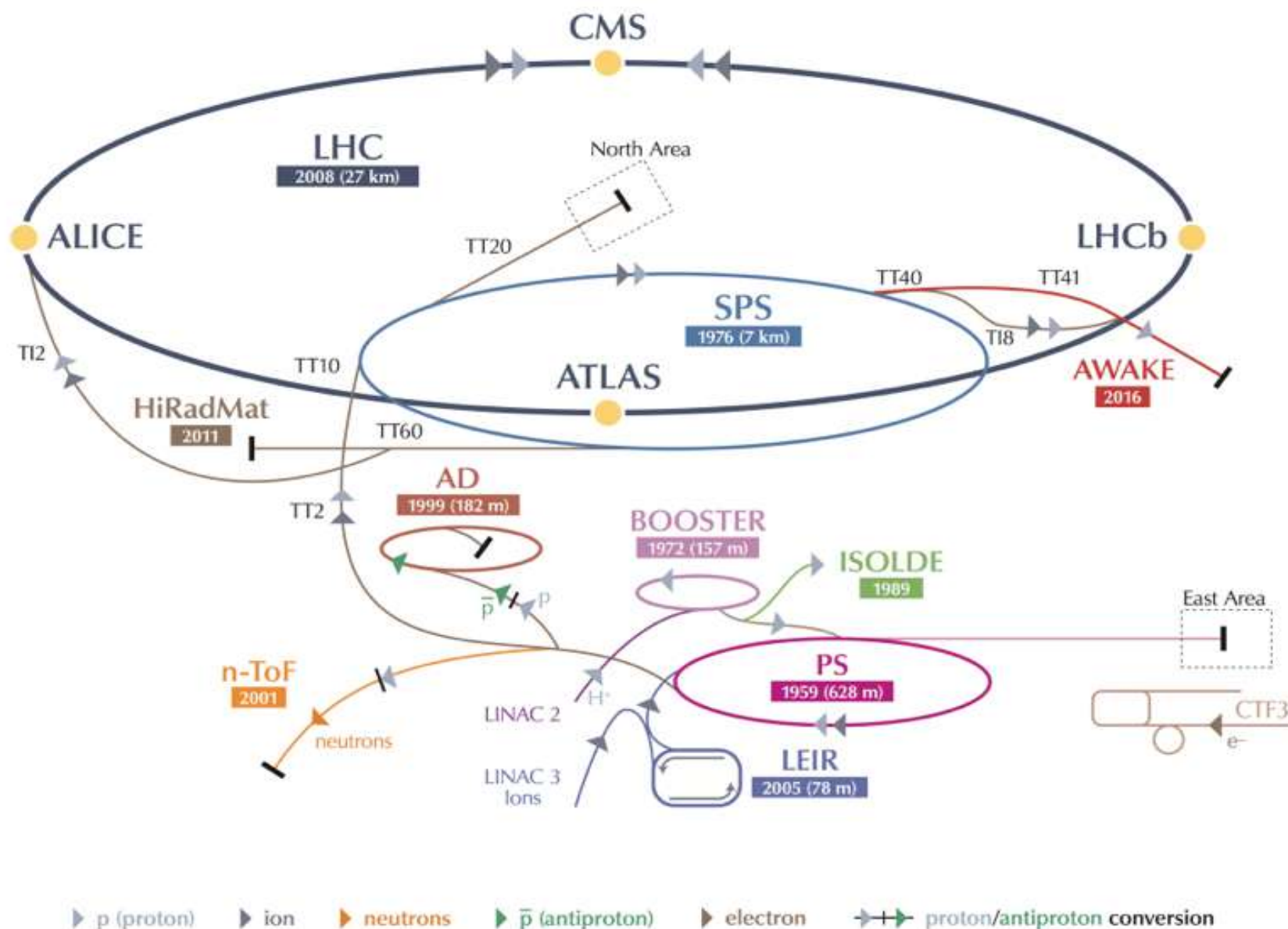
10 μm (pointing to σ_y)

$$\sigma_{\Phi} \sim 3 \cdot 10^{-30} \text{ cm}^2$$



frequenza degli eventi di produzione di
particelle Φ $L\sigma = 300$ eventi/s

FISICA FONDAMENTALE: ACCELERATORI DEL CERN



LEP (Large Electron Positron) CERN 1988-2001

LEP1

1300•10⁶ CHF costo dell'acceleratore e delle relative infrastrutture
1989 prime collisioni E = 46 GeV energia dello Z⁰

LEP2

1995 Installazione cavità superconduttrici E = 104 GeV

LEP è a tutt'oggi l'acceleratore che ha raggiunto le più alte energie per elettroni e positroni



LHC (Large Hadron Collider) CERN

LHC parametri

particelle collidenti protoni-protoni e anche ioni (Pb - Pb)

energia 7 TeV (massima per fascio)

numero di pacchetti 2808

angolo d'incrocio $300 \cdot 10^{-6}$ rad

emittanza $5 \cdot 10^{-10}$ m

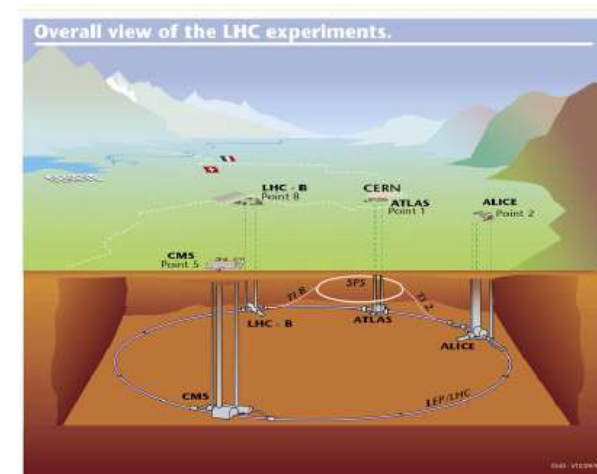
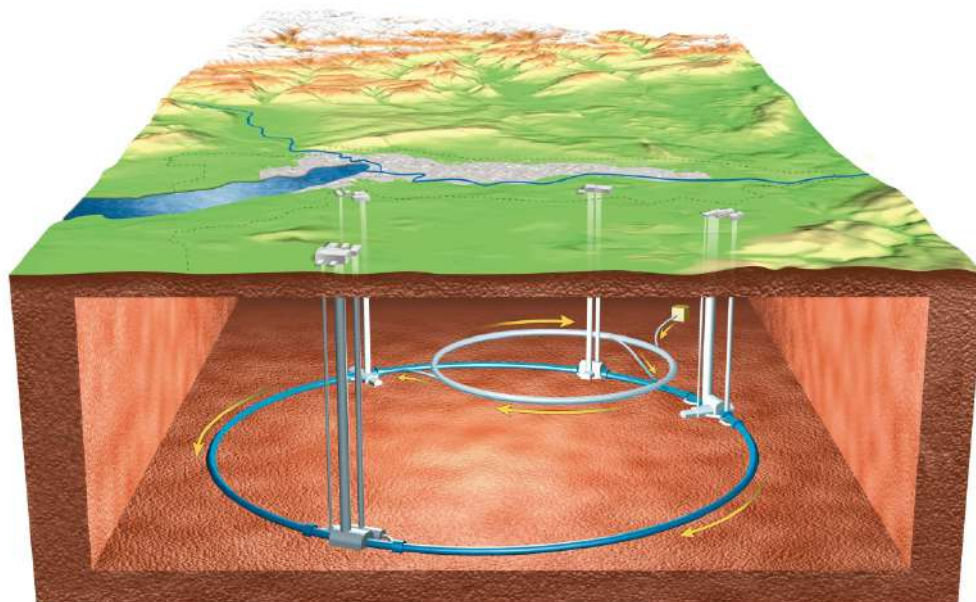
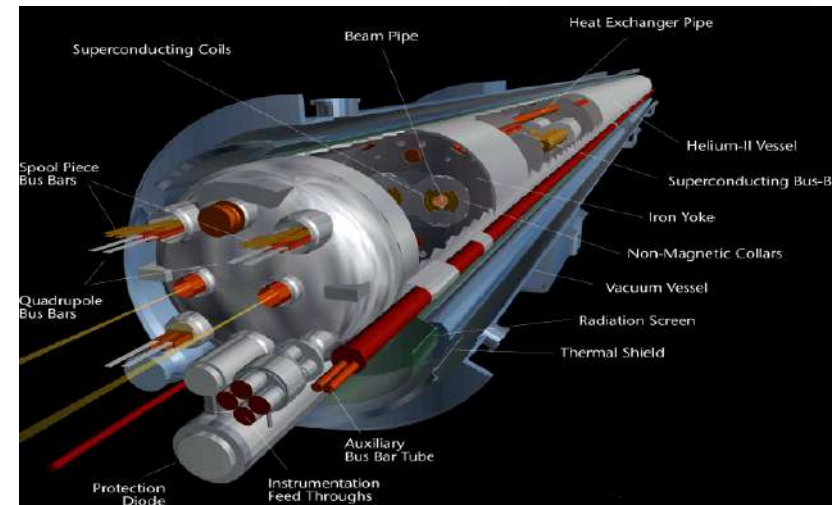
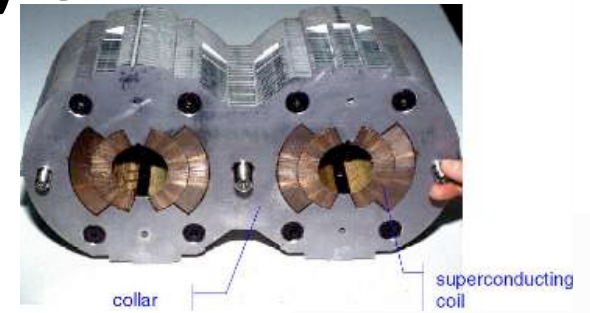
$\sigma_x = \sigma_y$ $16 \cdot 10^{-6}$ m

circonferenza 27.8 Km

$L = 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ (raggiunta $8 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)

$B_{\text{MAX dipoli}} = 83800 \text{ Gauss}$ con $I = 11700 \text{ A}$

$T = 1.9 \text{ °K}$

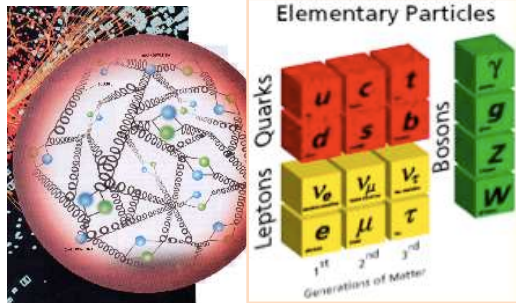




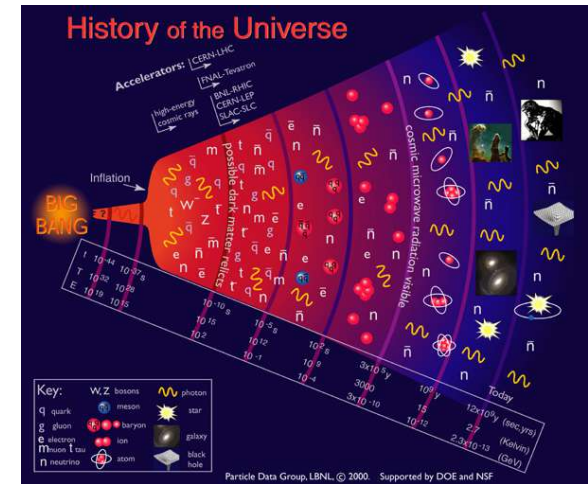
LUMINOSITA' ED ENERGIA

Le collisione tra due fasci di particelle o tra un fascio di particelle e un bersaglio ...

Forniscono informazioni sui costituenti ultimi del nostro universo e sulle leggi che li governano (**microscopio**)



Ricreando **densità di energia** sempre più elevate, consente di risalire ai primi istanti di vita dell'Universo e di studiarne l'evoluzione (**macchina del tempo**)



LINEE DI RICERCA PRINCIPALI SUGLI ACCELERATORI DI

PARTICELLE su cui maggiormente si investe nella fisica e tecnologia degli acceleratori di particelle riguardano:

**ALTI GRADIENTI
ACCELERANTI**

ALTA ENERGIA

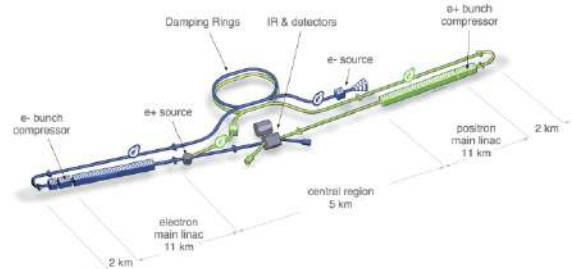
**ELEVATA QUALITA' DI
FASCIO**

**INTENSITA' DEI FASCI
DI PARTICELLE**

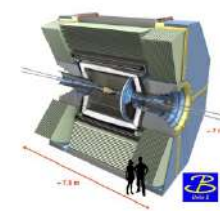
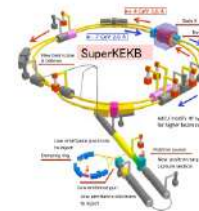
Macchine **compatte** anziché acceleratori chilometrici come sorgenti di radiazione (es FEL, acceleratori medicali,...).



**Collider ad alta energia
compatti per fisica
fondamentale (es. linear
collider)**



**Collider ad elevata
luminosità
(superKEKB,...)**



**Sorgenti di luce di
sincrotrone di
nuova generazione
(ESRF upgrade)**



IL LIMITE DELLE MACCHINE CIRCOLARI AD ALTA

ENERGIA

Macchine
adroniche (p,...)

$$\rho \cong \frac{p[GeV/c]}{0.3B}$$

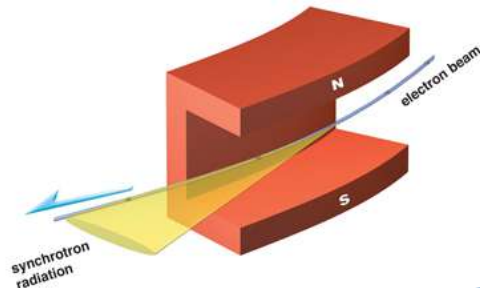


I massimi campi magnetici ottenibili con dipoli **superconduttori** sono dell'ordine di 15-20 T (8 T LHC)

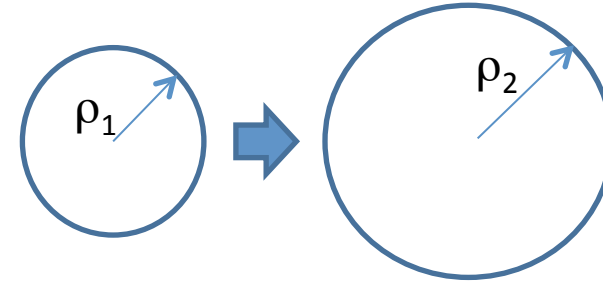
Macchine
leptoniche
(elettroni)

$$U_{\text{per giro}} \propto \frac{\gamma^4}{\rho}$$

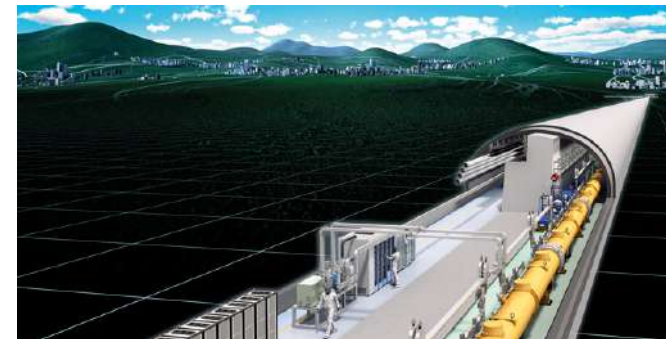
Il limite ancor più che sul raggio di curvatura massimo è dato dalla **potenza persa per emissione di luce di sincrotrone**



Macchine sempre più grandi



Acceleratore **lineare** con elevatissimi campi acceleranti



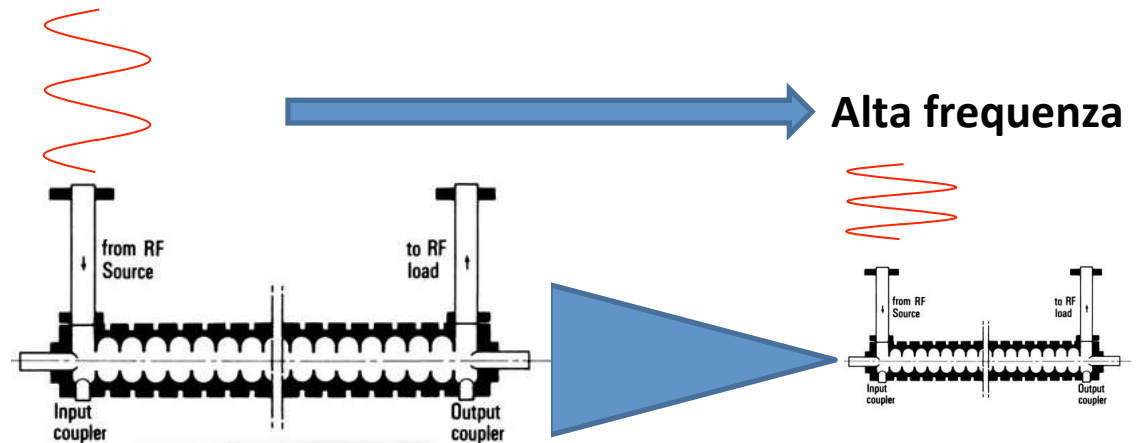
ALTI CAMPI ACCELERANTI $\Rightarrow$ ALTA FREQUENZA

L'idea di base è quella di **concentrare energia elettromagnetica** in spazi sempre più piccoli per aumentarne la densità e, quindi, il valore del campo accelerante.

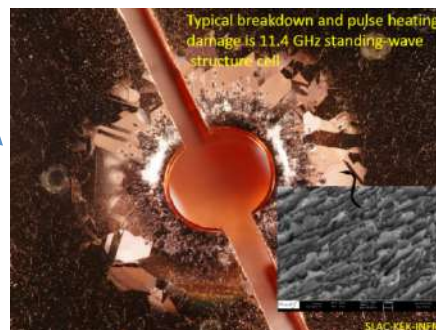
Alte frequenze di alimentazione

...Compatibilmente con:

- Disponibilità sorgenti elettromagnetiche
- Dissipazioni sulle strutture (potenze richieste)
- Limiti di scarica (breakdown)



STRUTTURE METALLICHE



Strutture ad alto gradiente possono raggiungere **~100-150 MV/m** di campo accelerante con numero di scariche limitato.

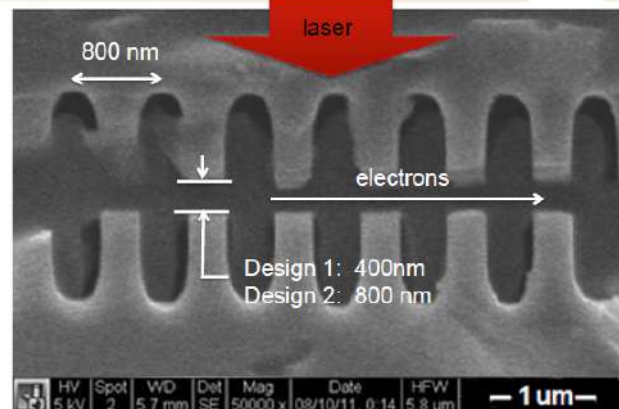
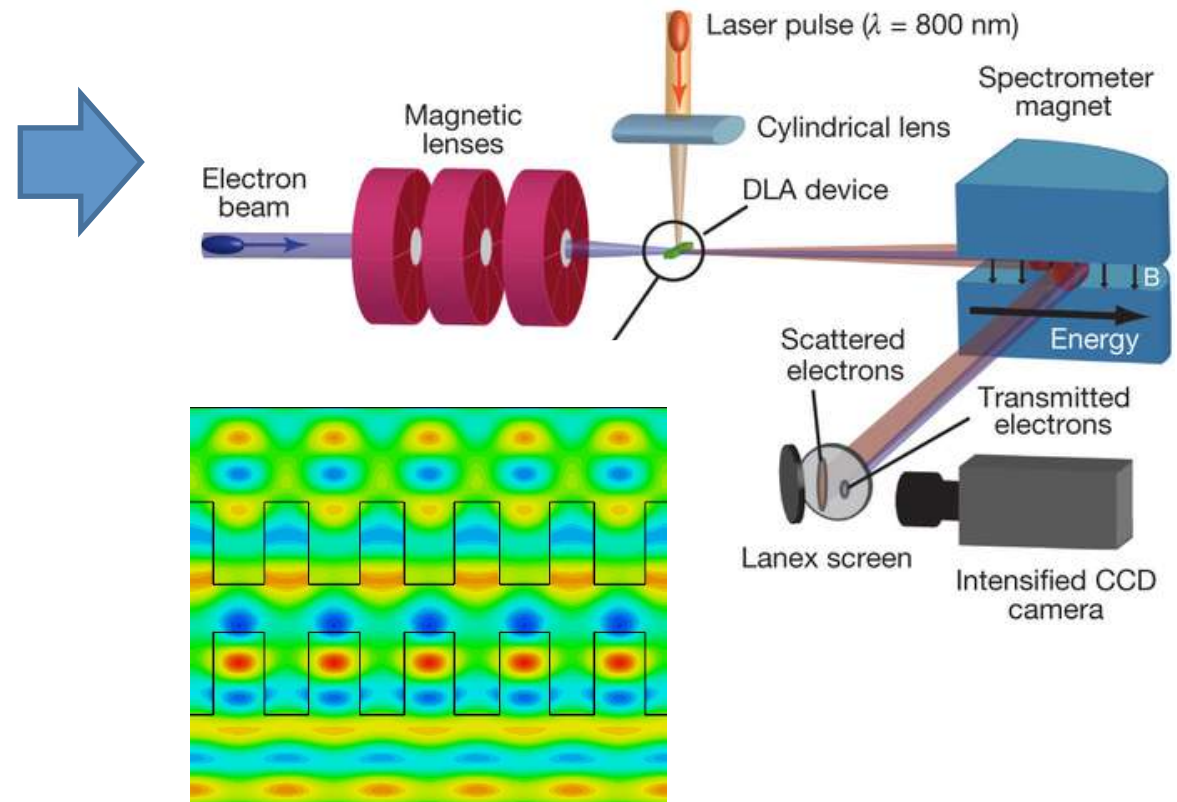
Sono comunque necessari km di strutture per raggiungere elevate energie ($\sim$ TeV)

STRUTTURE DIELETTRICHE ALIMENTATE DA LASER (DLA)

Sorgenti molto intense di onde elettromagnetiche ad elevatissima frequenza sono i **laser**

Alle frequenze tipiche dei laser (10^{13} - 10^{15} Hz) le **strutture metalliche non sono utilizzabili** (dissipazioni, etc..)

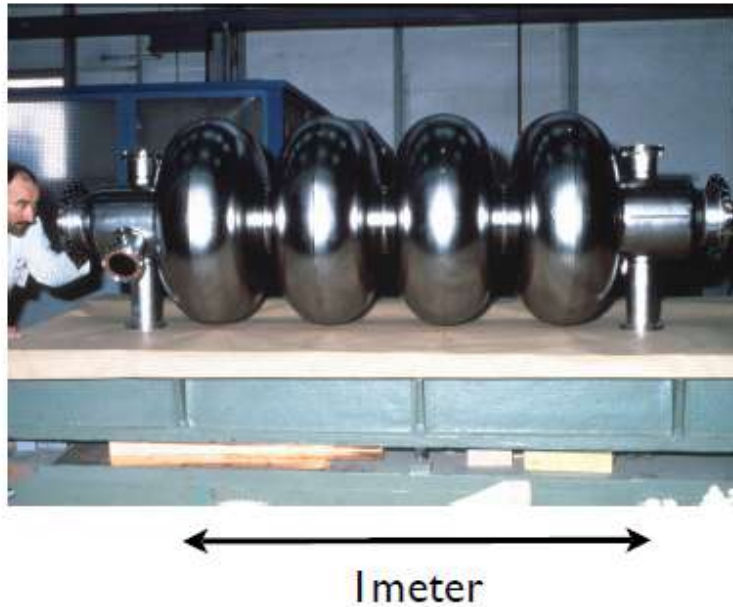
Si utilizzano **strutture dielettriche** di vario tipo



Gradienti fino a **>1 GV/m**
sono stati misurati

Frontiere nell'accelerazione: acceleratori a plasma

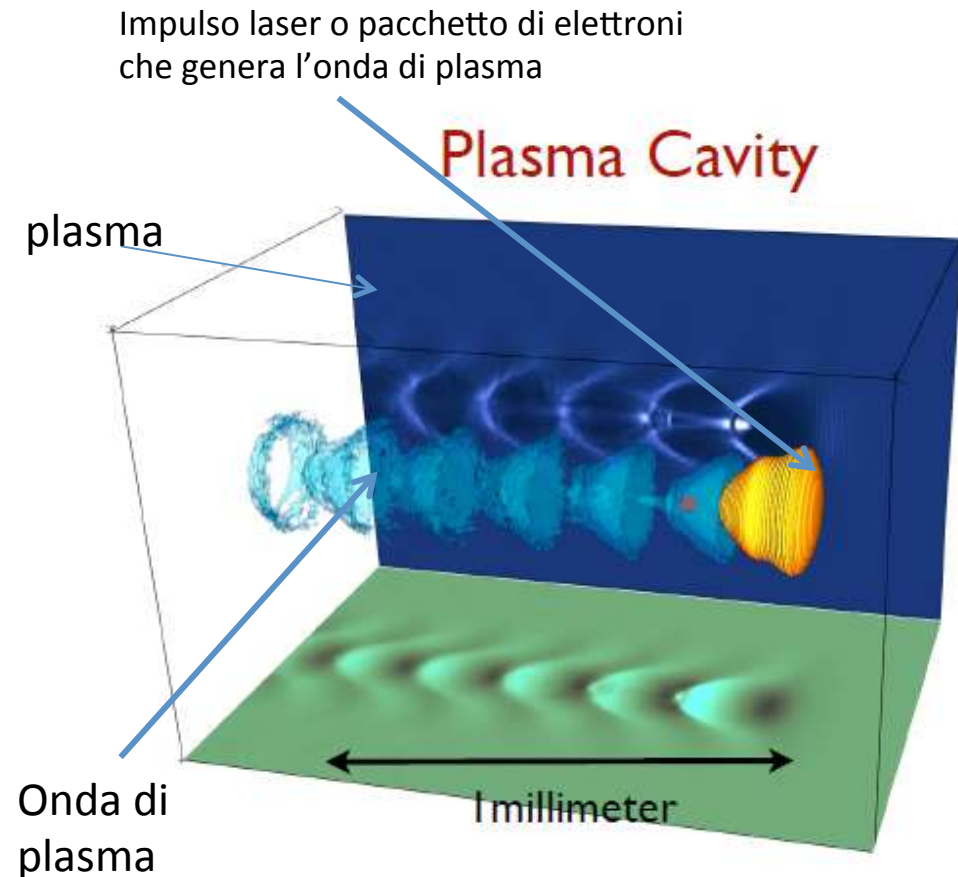
RF Cavity



Campo elettrico < 100 MV/m

Limitato da fenomeni di *scarica* all'interno delle strutture metalliche

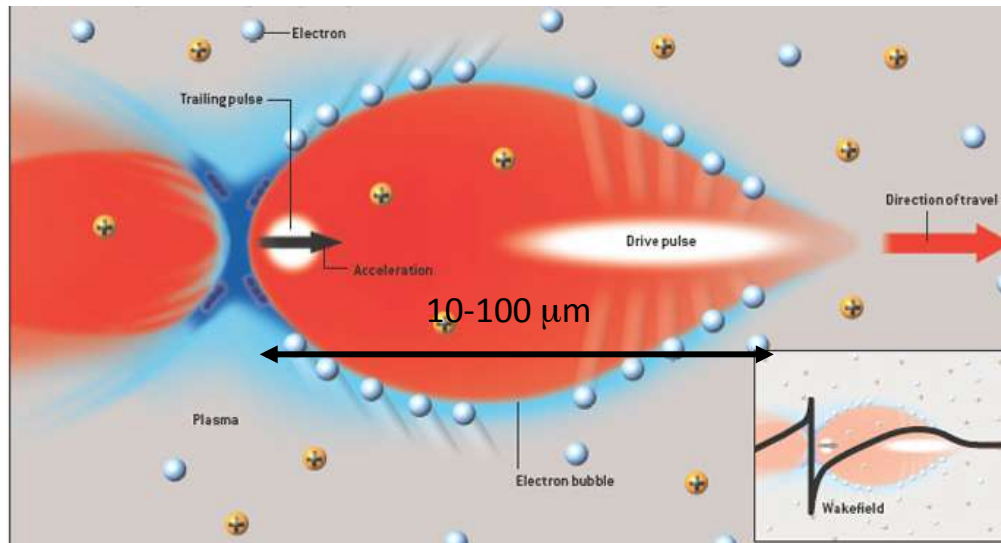
Plasma Cavity



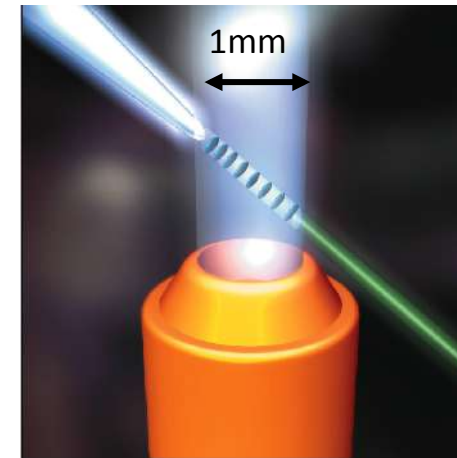
Negli acceleratori al plasma, un'onda di plasma viene generata da un **impulso laser** (o da un **pacchetto di elettroni**) che attraversa il plasma stesso. Nell'onda di plasma si possono raggiungere campi superiori ai 100 GV/m

km  m

ACCELERAZIONE LASER-PLASMA (LWFA)



laser Gas jet



VIDEO

Elettroni accelerati

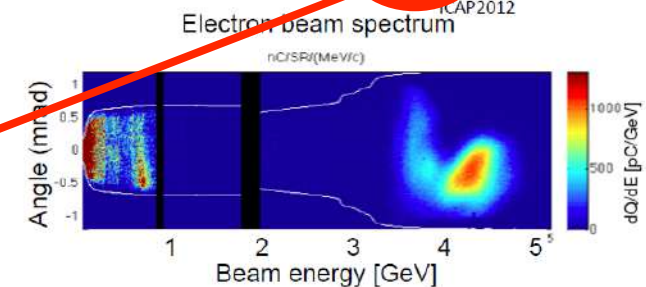
$$E_0 = \frac{m_e c \omega_p}{e} \approx 100 \left[\frac{\text{GeV}}{m} \right] \cdot \sqrt{n_0 [10^{18} \text{ cm}^{-3}]}$$

4.25 GeV beams have been obtained from 9 cm plasma channel powered by 310 TW laser pulses (15 J)

*C. Benedetti et al., proceedings of AAC2010, proceedings of IACAP2012



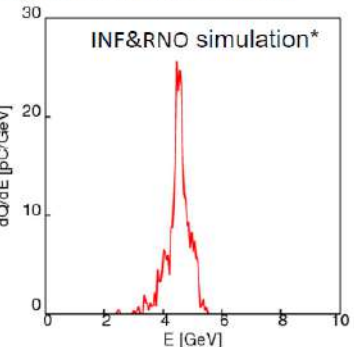
Leader mondiale: BELLA Center, Accelerator Technology and Applied Physics Division
Lawrence Berkeley National Laboratory



$$E_{\text{acc}} \approx 50 \text{ GV/m}$$

- **Laser** (E=15 J):
 - Measured longitudinal profile ($T_0 = 40 \text{ fs}$)
 - Measured far field mode ($w_0 = 53 \mu\text{m}$)
- **Plasma**: parabolic plasma channel (length 9 cm, $n_0 \sim 6\text{-}7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$)

W.P. Leemans et al., PRL 2014

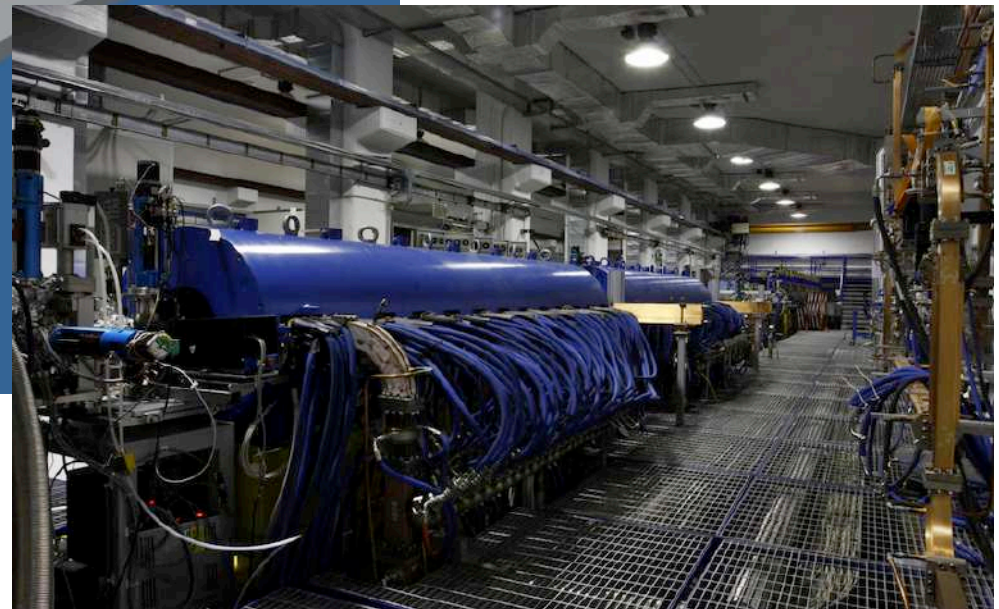
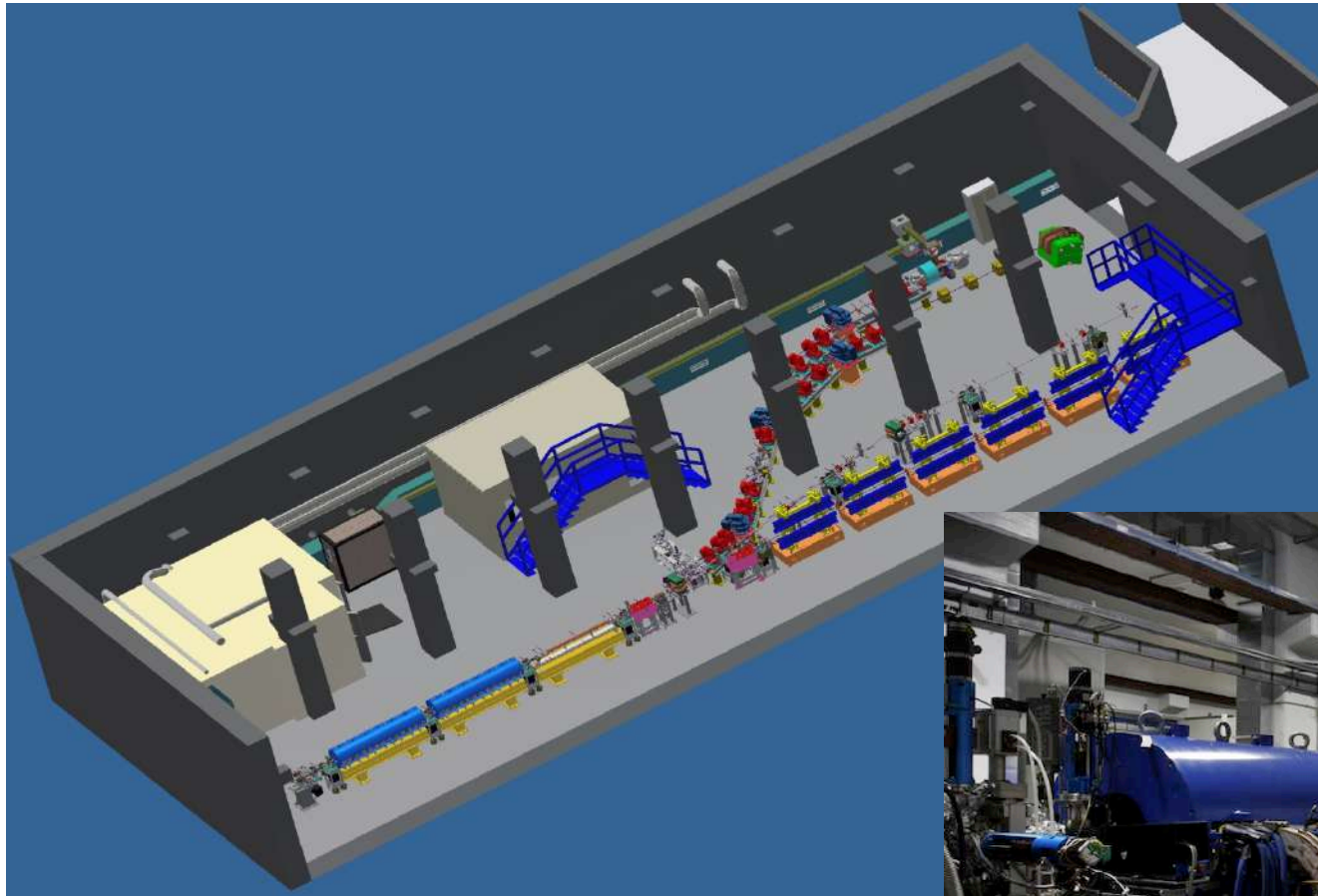


	Exp.	Sim.
Energy	4.25 GeV	4.5 GeV
$\Delta E/E$	5%	3.2%
Charge	~20 pC	23 pC
Divergence	0.3 mrad	0.6 mrad

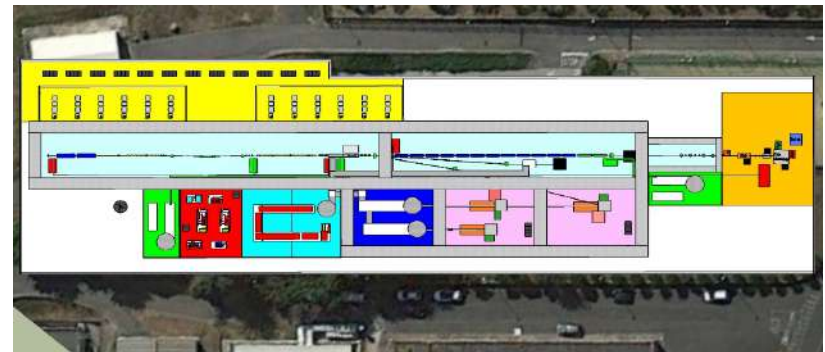
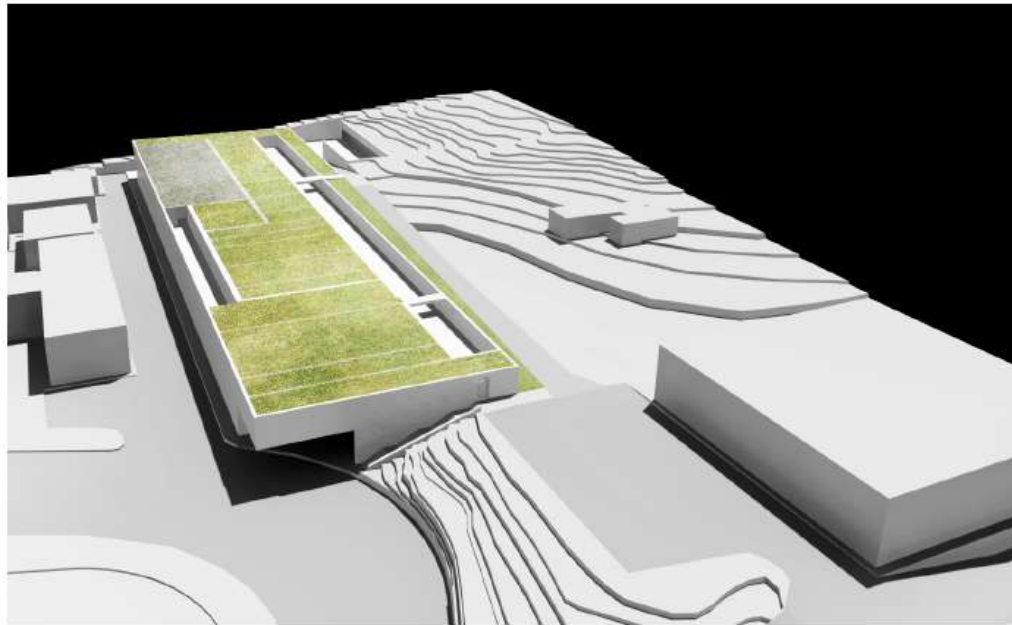
SPARC_LAB @LNF

(Sources for Plasma Accelerators and Radiation Compton with Lasers And Beams)

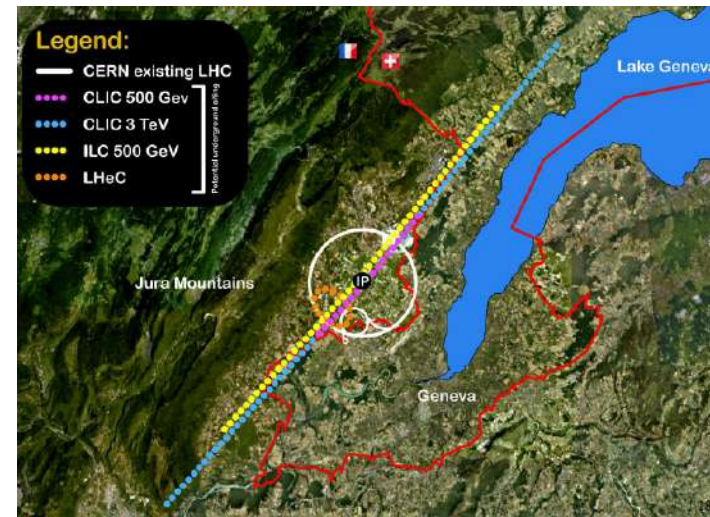
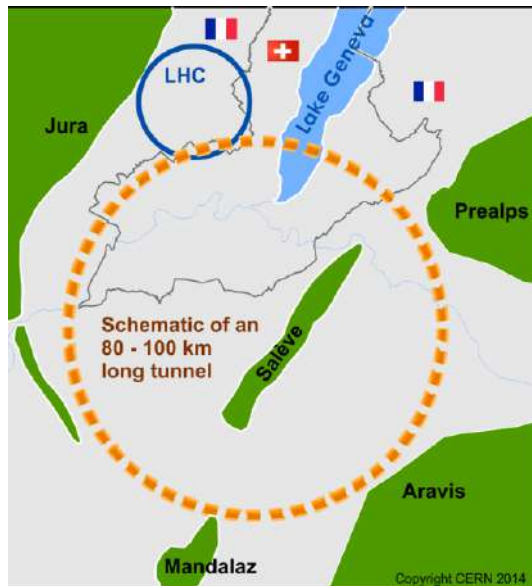
Anche ai LNF abbiamo un acceleratore dedicato ad esperimenti di: FEL, accelerazione al plasma, Generazione di radiazione THz e radiazione Compton.



EuPRAXIA@SPARC_LAB

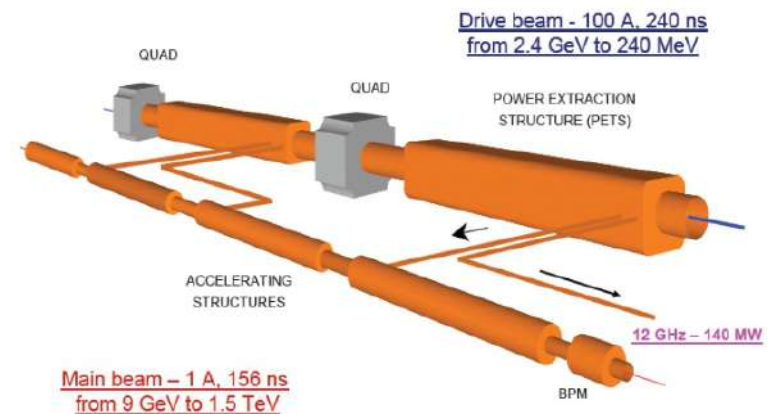


PROPOSTE DI FUTURI COLLIDER AL CERN DOPO LHC



FCC hadron collider parameters

Parameter	FCC-hh		SPPC	LHC	HL LHC
collision energy cms [TeV]	100		71.2	14	
dipole field [T]	16		20	8.3	
# IP	2 main & 2		2	2 main & 2	
bunch intensity [10 ¹¹]	1	1 (0.2)	2	1.1	2.2
bunch spacing [ns]	25	25 (5)	25	25	25
luminosity/lp [10 ³⁴ cm ⁻² s ⁻¹]	5	~25	12	1	5
events/bunch crossing	170	~850 (170)	400	27	135
stored energy/beam [GJ]	8.4		6.6	0.36	0.7
synchrotron radiation [W/m/aperture]	30		58	0.2	0.35



12 GHz (X-band): 100 MV/m





*Quanto costa la ricerca in
fisica delle alte energie?*



F16	\$15M
F117-A (stealth)	\$100M
Dafne and KLOE	\$150M
B-1B	\$200M
INFN/year	\$280M
B-2B (stealth)	\$2B
Space shuttle:	\$4B
Launching	\$400M
Messina Bridge	\$5B
NASA/year	\$15B
ISS	\$40B
US Defense/year	\$400B



CONCLUSIONI

Gli **acceleratori di particelle** sono **strumenti** utilizzati per una **straordinaria varietà di applicazioni** che vanno dalla fisica delle alte energie e della materia alla diagnostica e terapia in ambito medico, dall'industria ai sistemi di sicurezza.

⇒ GLI ACCELERATORI DI PARTICELLE RIMANGONO **UNO DEGLI STRUMENTI PIU' POTENTI NELL'AMBITO DELLA RICERCA** IN FISICA DELLA MATERIA E DELLE PARTICELLE CON **FONDAMENTALI APPLICAZIONI IN AMBITO MEDICO E INDUSTRIALE.**

⇒ LA PROSPETTIVA DEL LORO UTILIZZO IN AMBITO ENERGETICO (ADS) VA ASSOLUTAMENTE **ESPLORATA E VALUTATA** CON UN IMPEGNO A LIVELLO INTERNAZIONALE

In quali direzioni si sta andando per rendere le macchine acceleratrici sempre più **compatte ed efficienti**?

⇒ **UNA SALTO NELLA TECNOLOGIA E' ORMAI NECESSARIO**

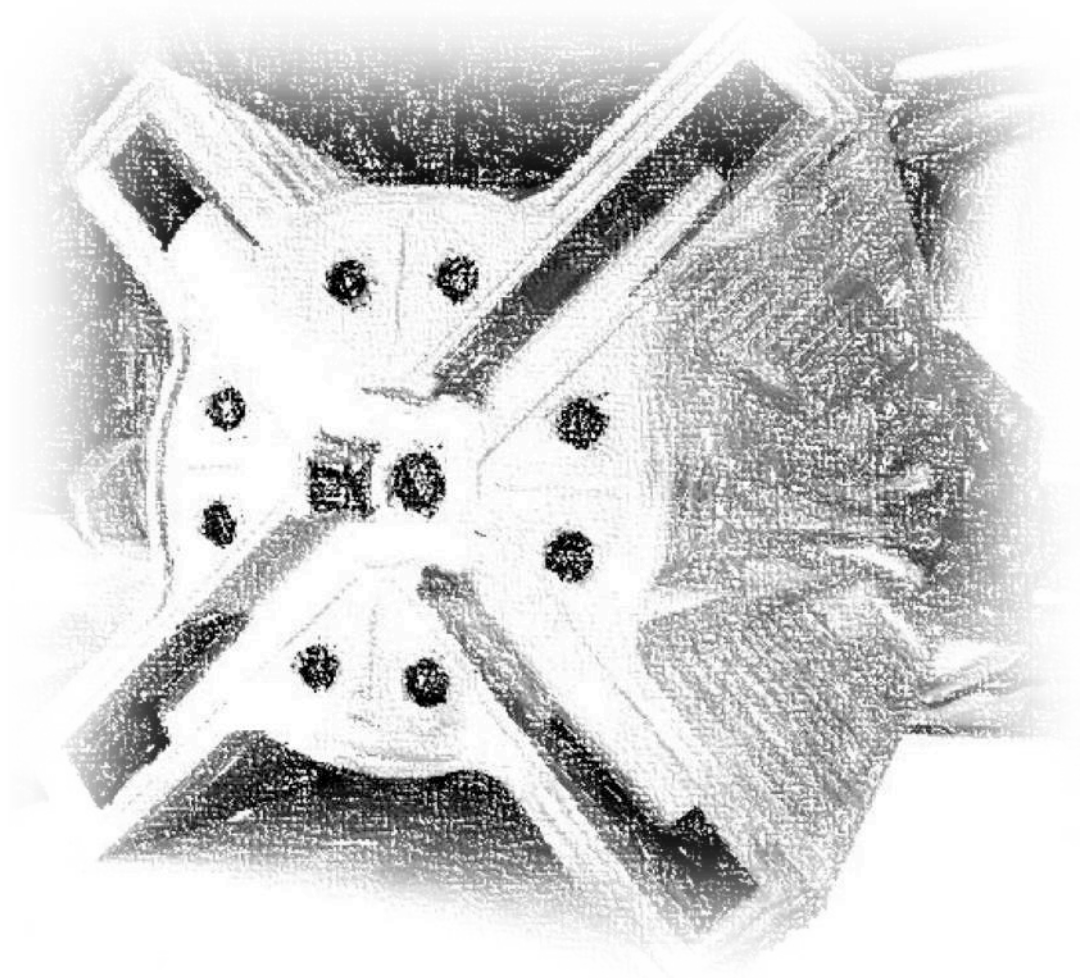
Quali sono i **limiti e le sfide** nell'ambito della fisica e tecnologia degli acceleratori di particelle?

⇒ **NUOVE IDEE** E IMPORTANTI RISULTATI HANNO APERTO NUOVE E PROMETTENTI STRADE

Quali i **possibili scenari** futuri?

⇒ L' R&D NELLA FISICA E TECNOLOGIA DEGLI ACCELERATORI DI PARTICELLE RIMANE UNO DEI SETTORI PIU' **ENTUSIASMANTI DELLA RICERCA** IN FISICA APPLICATA IN CUI **FANTASIA E CREATIVITA'** SONO GLI INGREDIENTI FONDAMENTALI

UN SENTITO GRAZIE PER LA VOSTRA ATTENZIONE!!!!



Ringrazio...

M. E. Biagini, M. Boscolo, A. Cianchi, M. Ferrario, A. Gallo, S. Guiducci, C. Milardi, A. Mostacci e tutti gli autori da cui ho preso immagini e trasparenze.

Alcuni link Bibliografici

Scuole acceleratori

CERN Accelerator School:

<http://cas.web.cern.ch/cas/>

<http://cdsweb.cern.ch/record/235242?ln=it>

JUAS

<https://espace.cern.ch/juas/SitePages/Home.aspx>

USPAS

<http://uspas.fnal.gov/>

M. Sands, The Physics of Electron Storage Rings: An Introduction, SLAC- 121 UC-28 (ACC)

<http://www.slac.stanford.edu/pubs/slacreports/slac-r-121.html>

Helmut Wiedemann, Particle Accelerator Physics, Springer-Verlag Berlin Heidelberg , 2007

Animazione LINAC SLAC

<http://lcls.slac.stanford.edu/AnimationViewLCLS.aspx>