

# Gli acceleratori di particelle

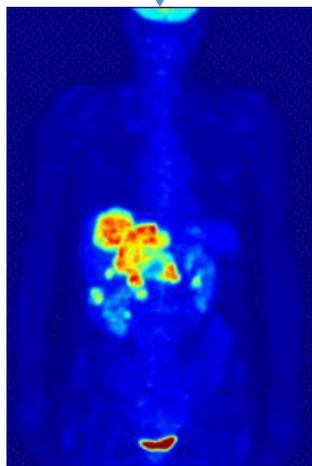
*David Alesini*

*Divisione Acceleratori*

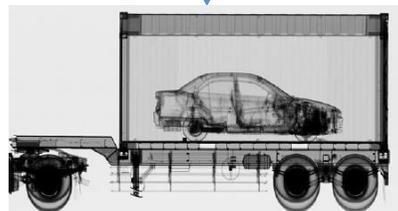
*LNF-INFN*



# A COSA SERVONO GLI ACCELERATORI DI PARTICELLE?



Produzione di radioisotopi



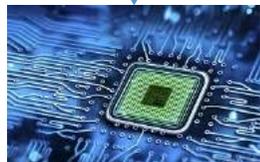
sicurezza



sterilizzazione



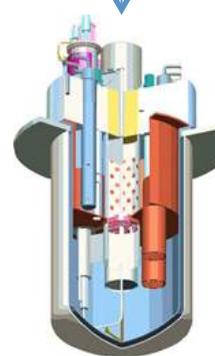
Radioterapia e Adroterapia



Impiantazione ionica



Trattamento materiali



Reattori a fissione controllati



Studi di materiali per fusione nucleare



Produzione di raggi X e  $\gamma$  per fisica della materia



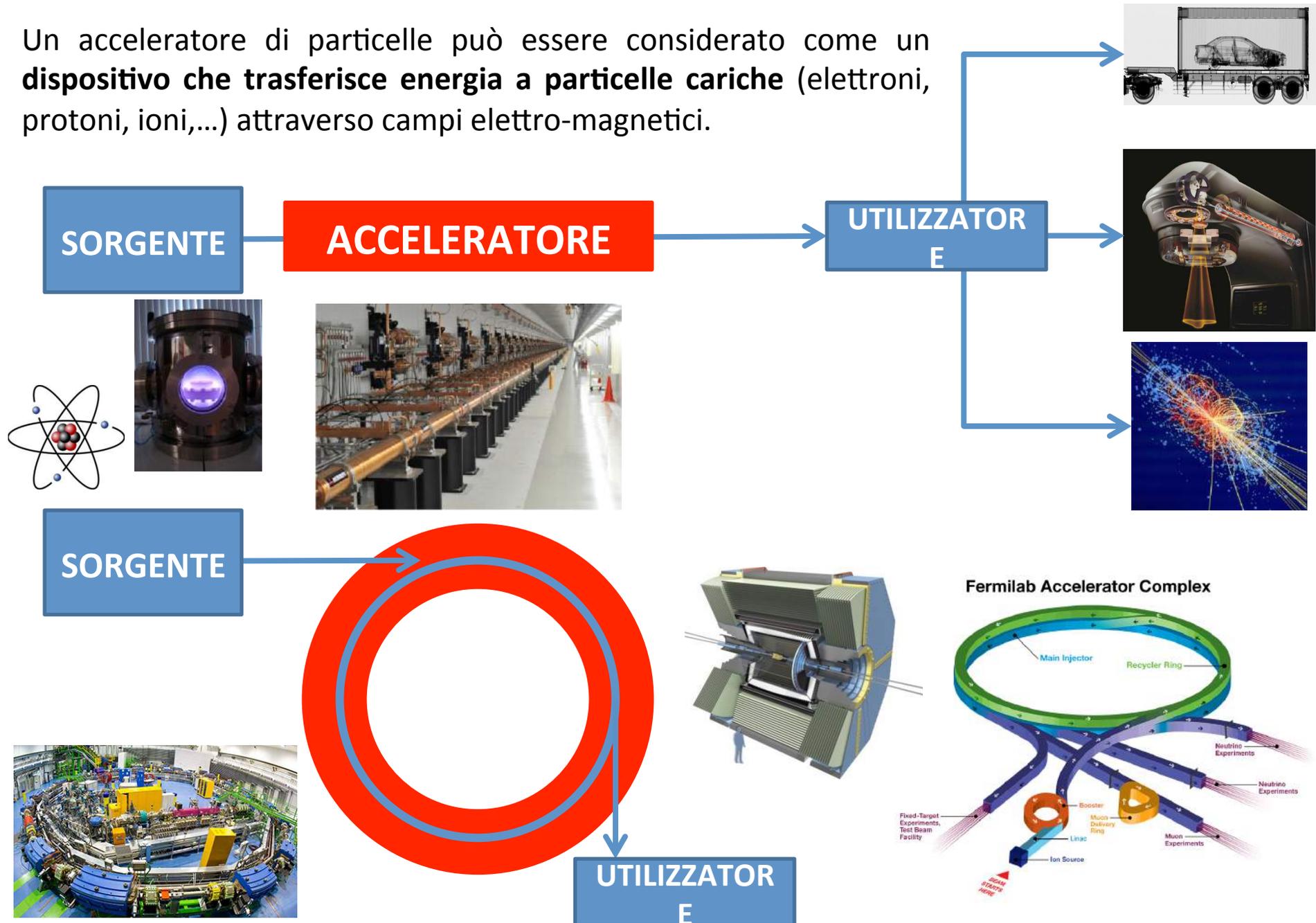
Sorgenti di neutroni



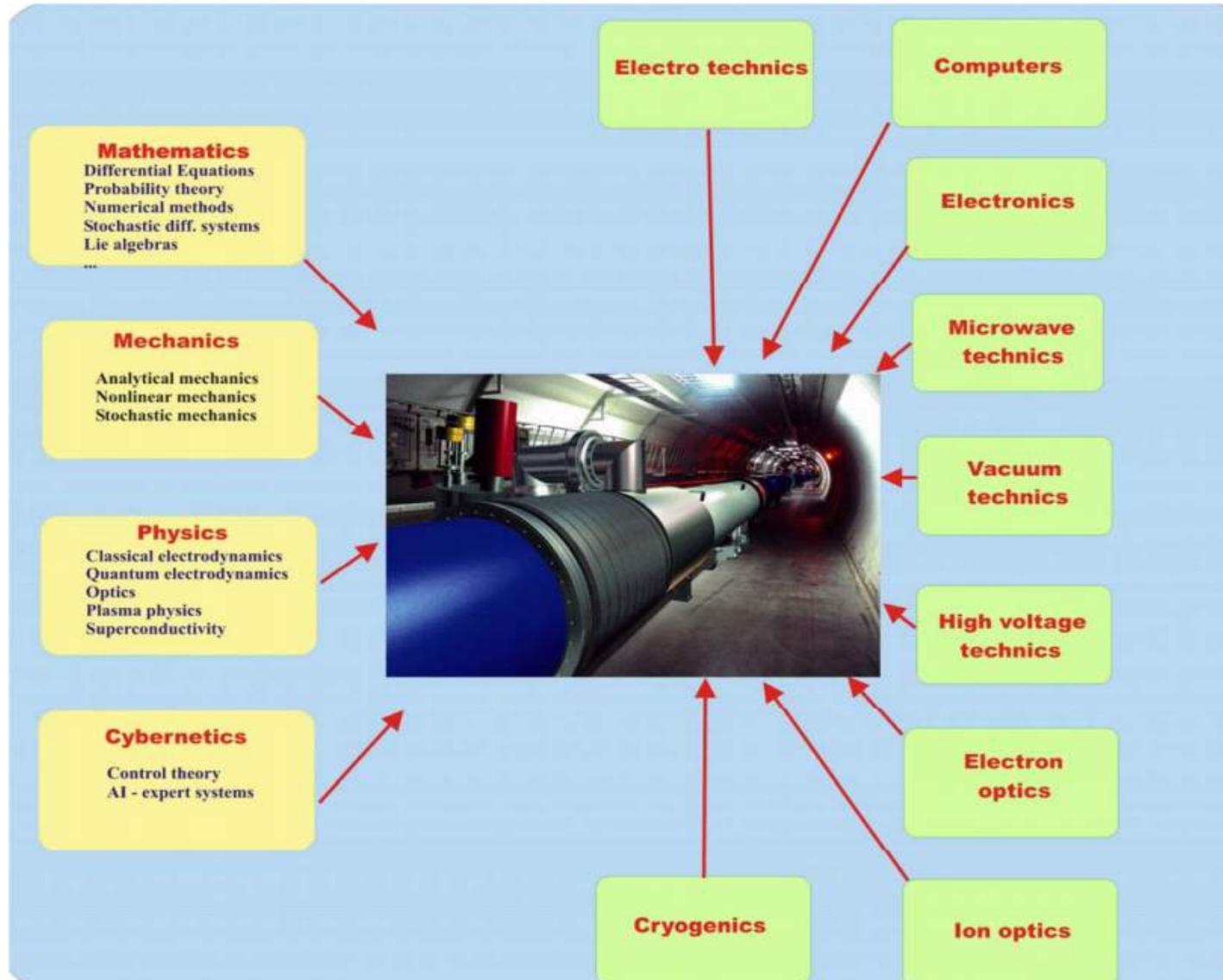
Fisica delle alte energie

# 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.

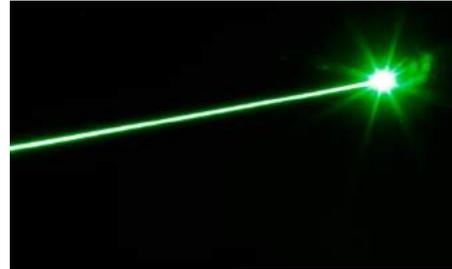
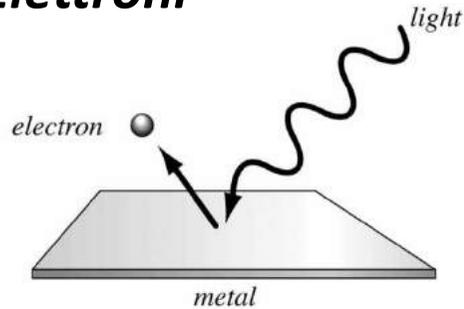


# Interdisciplinarietà della fisica e tecnologia degli acceleratori di particelle

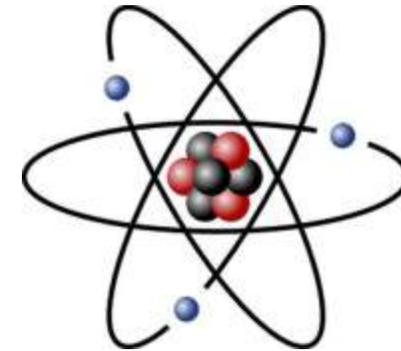
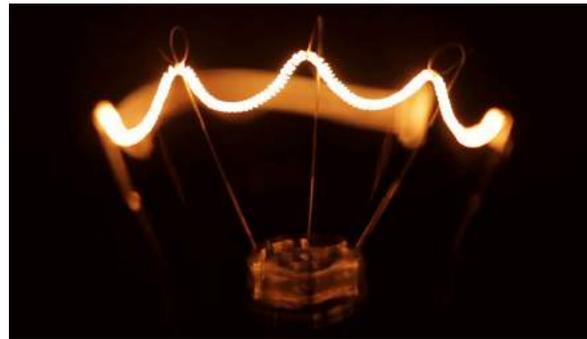
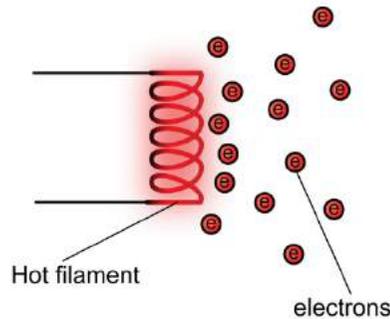


# SORGENTI DI PARTICELLE

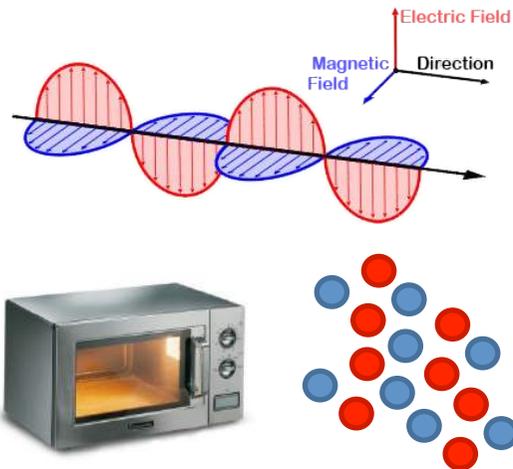
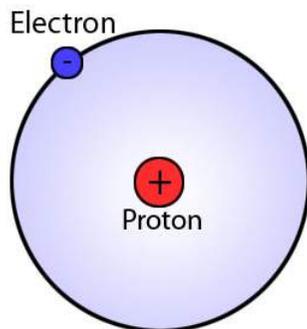
## Electroni



Gli **Electroni** 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**.

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

$\vec{p}$  = momentum

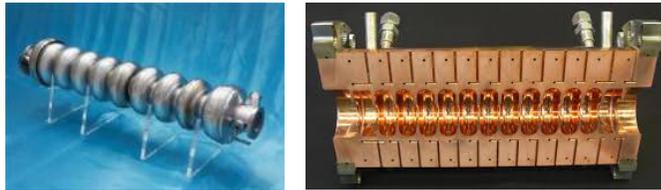
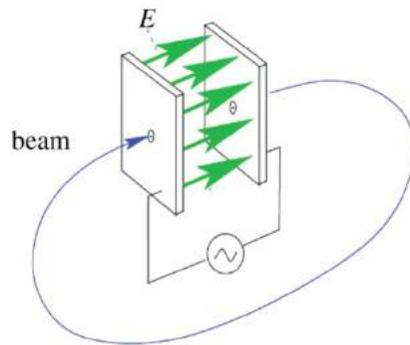
$m$  = mass

$\vec{v}$  = velocity

$q$  = charge

## ACCELERATION

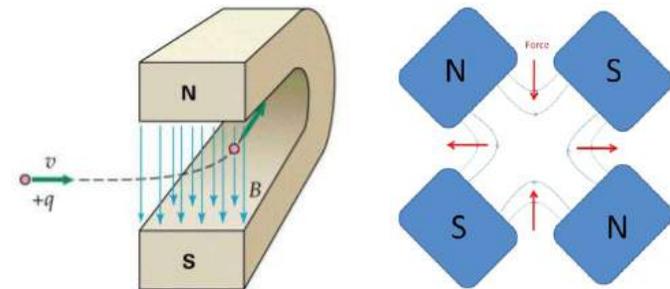
To accelerate, we need a force in the direction of motion



Longitudinal Dynamics

## BENDING AND FOCUSING

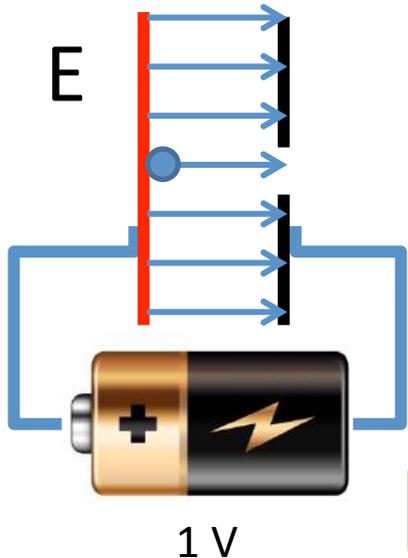
2<sup>nd</sup> term always perpendicular to motion => no energy gain



Transverse Dynamics

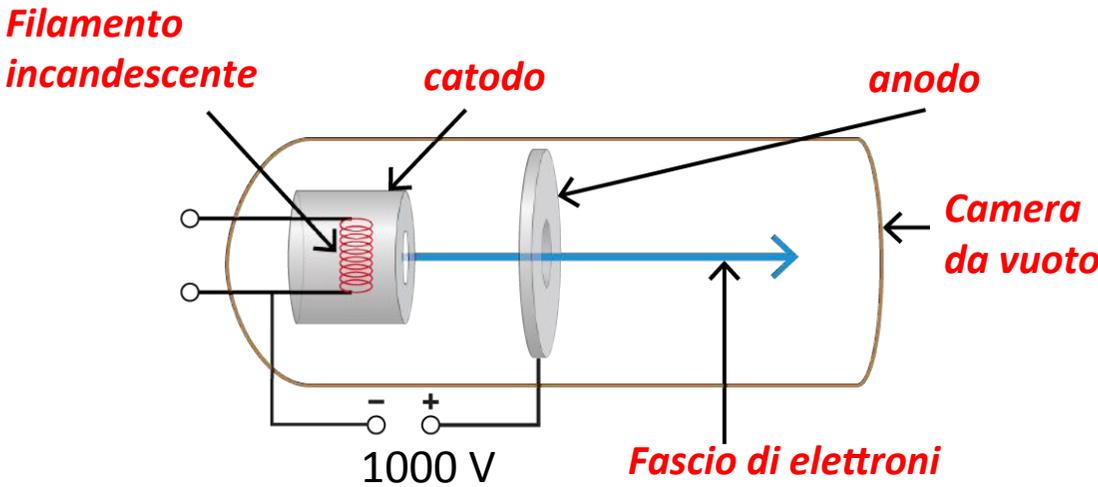
# ACCELERAZIONE DI PARTICELLE: CAMPO ELETTRICO

Le particelle vengono accelerate con l'utilizzo di campi elettrici

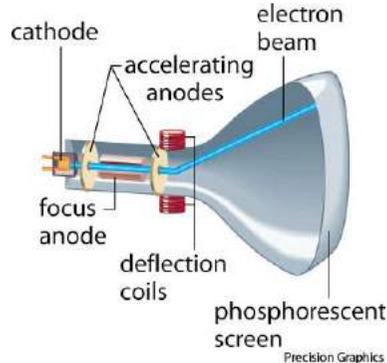


Guadagno di Energia  $\propto$  ddp (V)

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



220 V

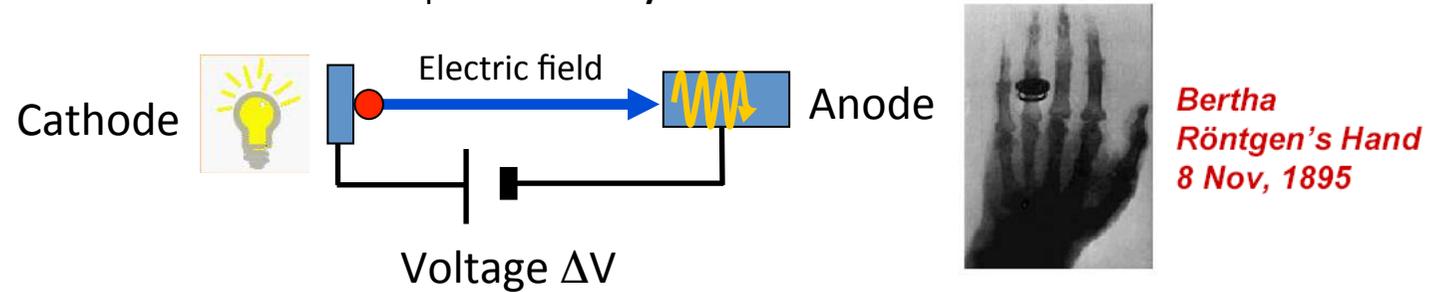


$10^5$  V



# 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.

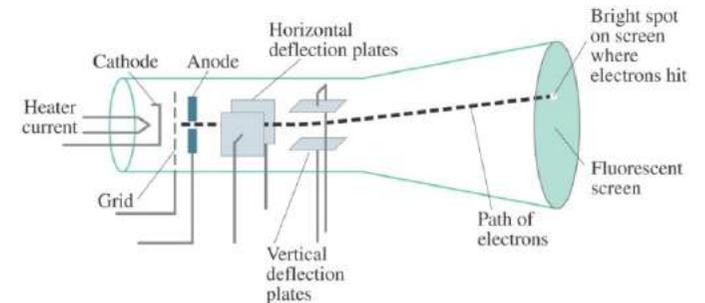
$$\frac{d\vec{p}}{dt} = q\vec{E} \Rightarrow \Delta E = q\Delta V$$

$\vec{p}$  = 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 eV =  $1.6 \times 10^{-19}$  J



# PARTICLE VELOCITY VS ENERGY: LIGHT AND HEAVY PARTICLES

Single particle

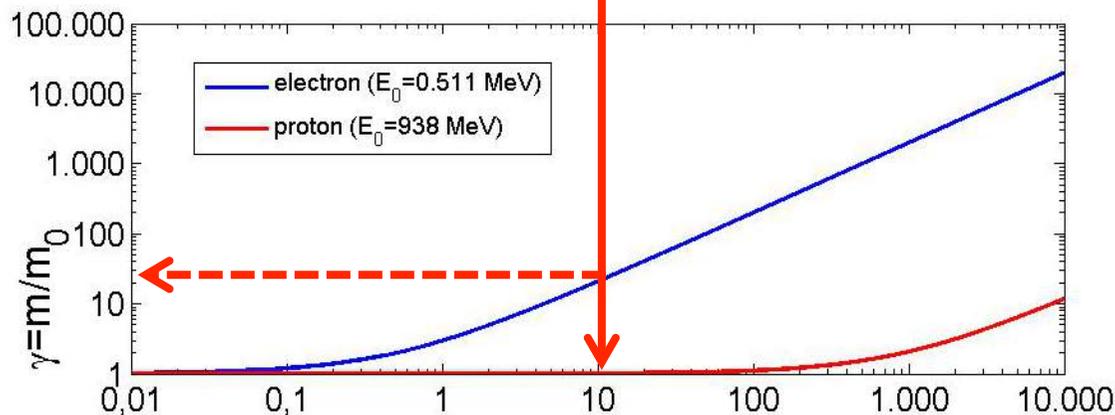
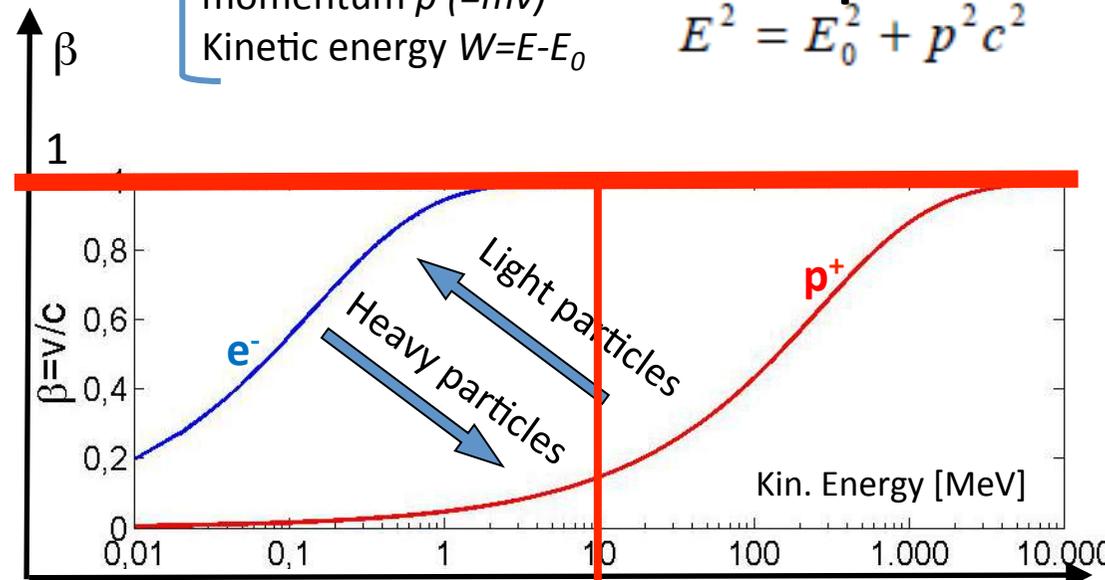
- rest mass  $m_0$
- rest energy  $E_0 (=m_0c^2)$
- total energy  $E$
- mass  $m$
- velocity  $v$
- momentum  $p (=mv)$
- Kinetic energy  $W=E-E_0$

Relativistic factor  
 $\beta=v/c (<1)$   
 Relativistic factor  
 $\gamma=E/E_0 (\geq 1)$

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

$$\begin{cases} \beta = \sqrt{1 - 1/\gamma^2} \\ \gamma = 1/\sqrt{1 - \beta^2} \quad (m = \gamma m_0) \\ W = (\gamma - 1)m_0c^2 \approx \frac{1}{2}m_0v^2 \text{ if } \beta \ll 1 \end{cases}$$

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



⇒ **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.

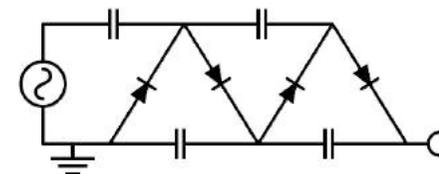
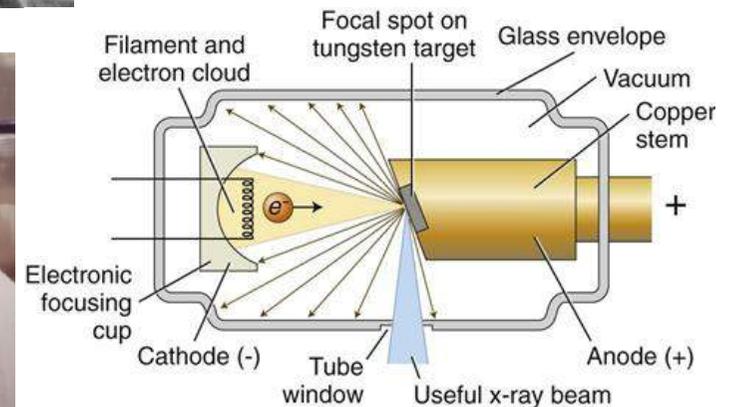
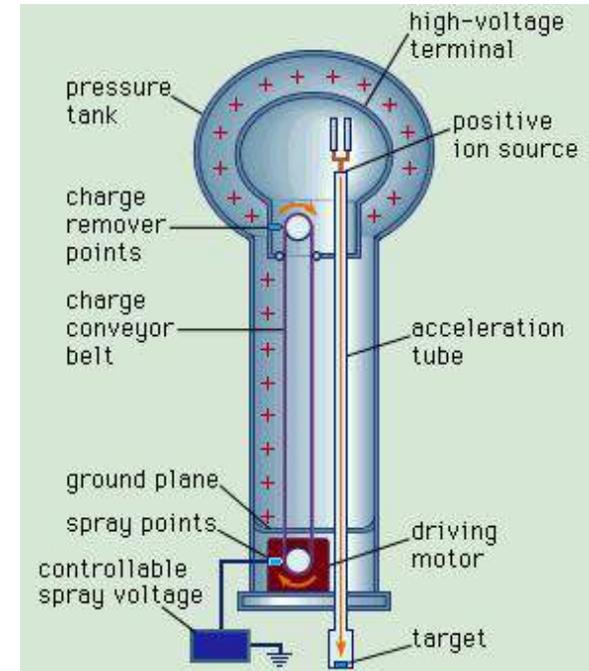
## APPLICATIONS OF DC ACCELERATORS

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

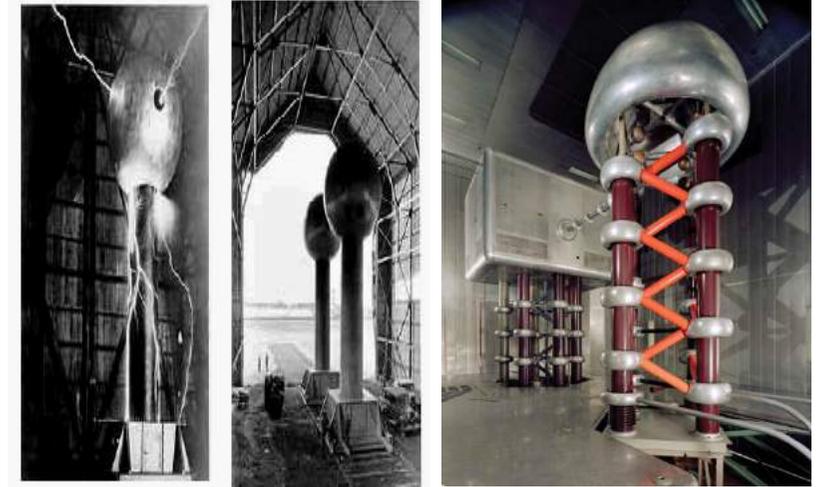
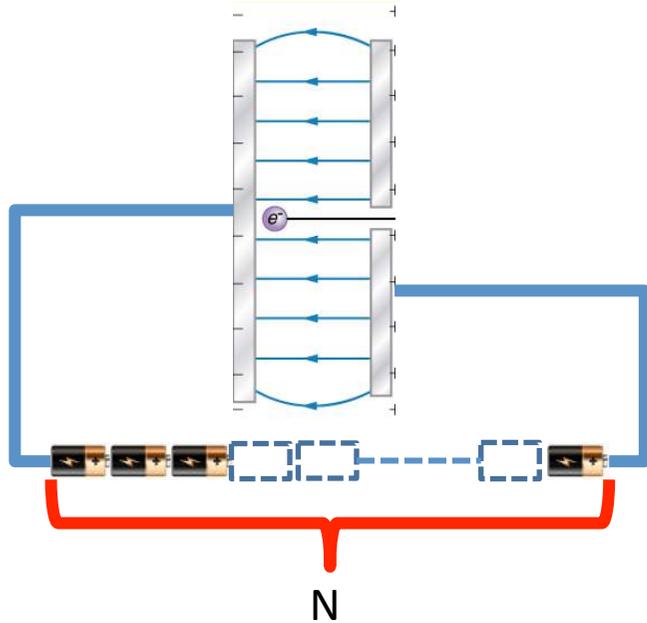
They are used for:

- ⇒ *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

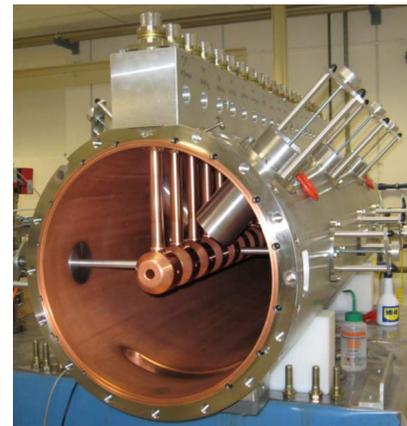
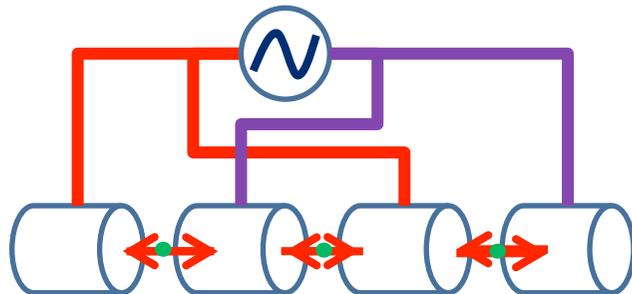


# ACCELERAZIONE DI PARTICELLE CON CAMPI ELETTRICI E A RADIOFREQUENZA



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

Campi variabili (a radiofrequenza)



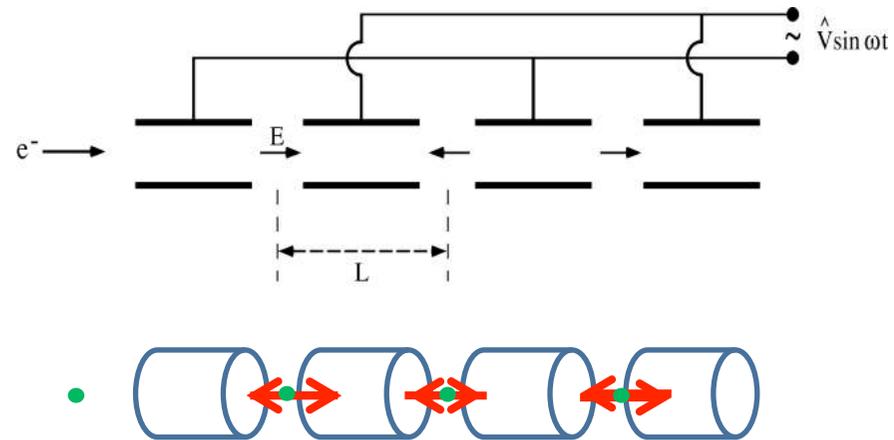
Si possono ottenere tensioni equivalenti fino a  $100\text{ MV/m}$

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)**.

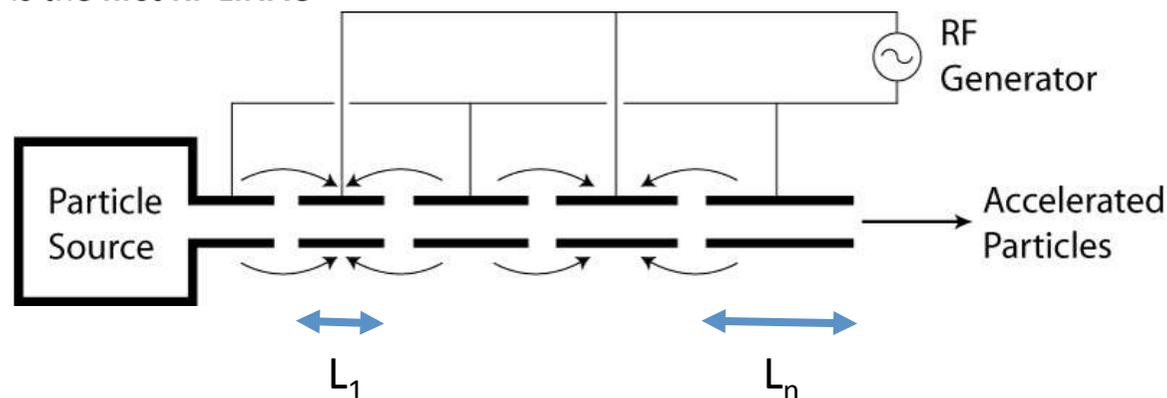


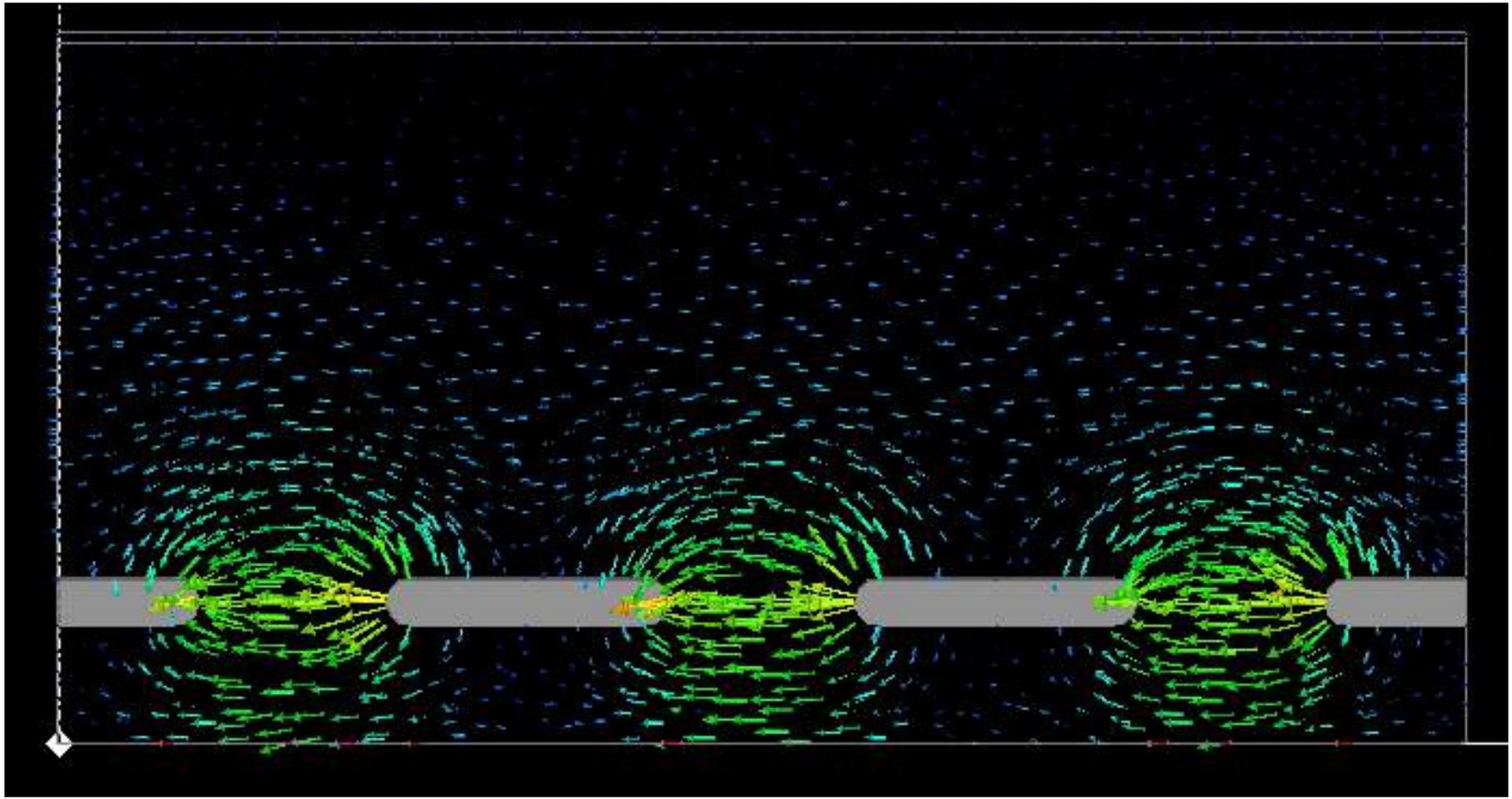
Rolf Wideroe

⇒ 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.

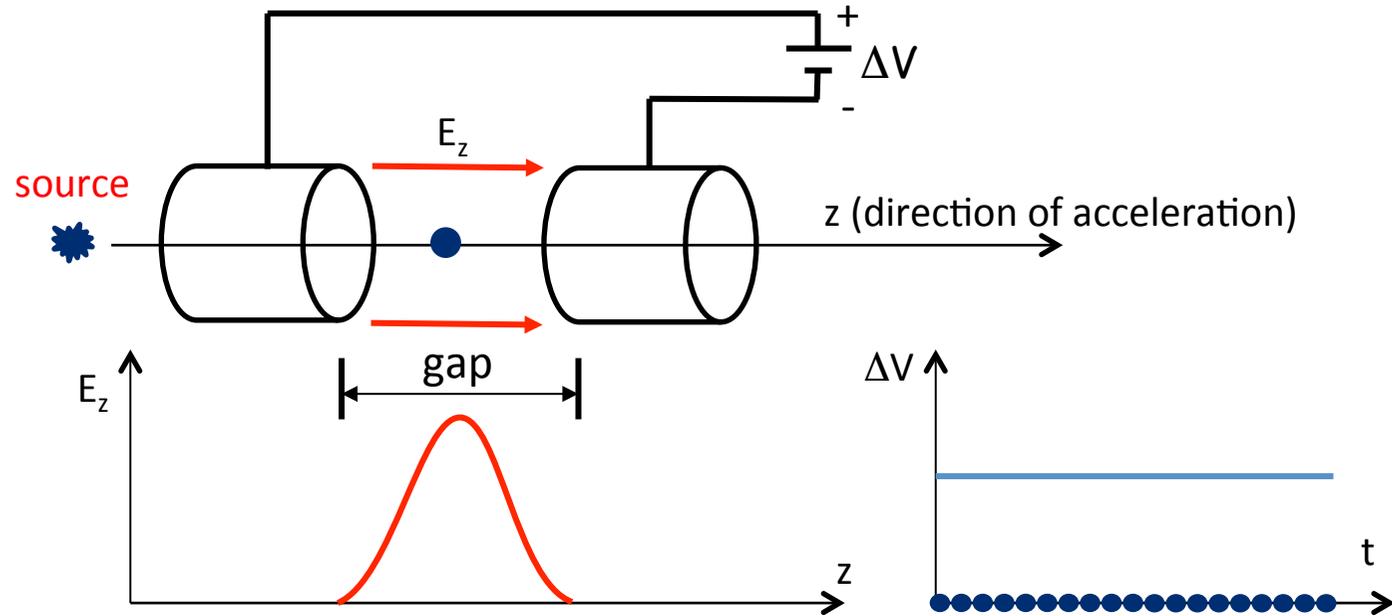
⇒ The Wideroe LINAC is the **first RF LINAC**





# ELECTROSTATIC ACCELERATION: CONTINUOUS BEAM

We consider the acceleration between two electrodes in DC.



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

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

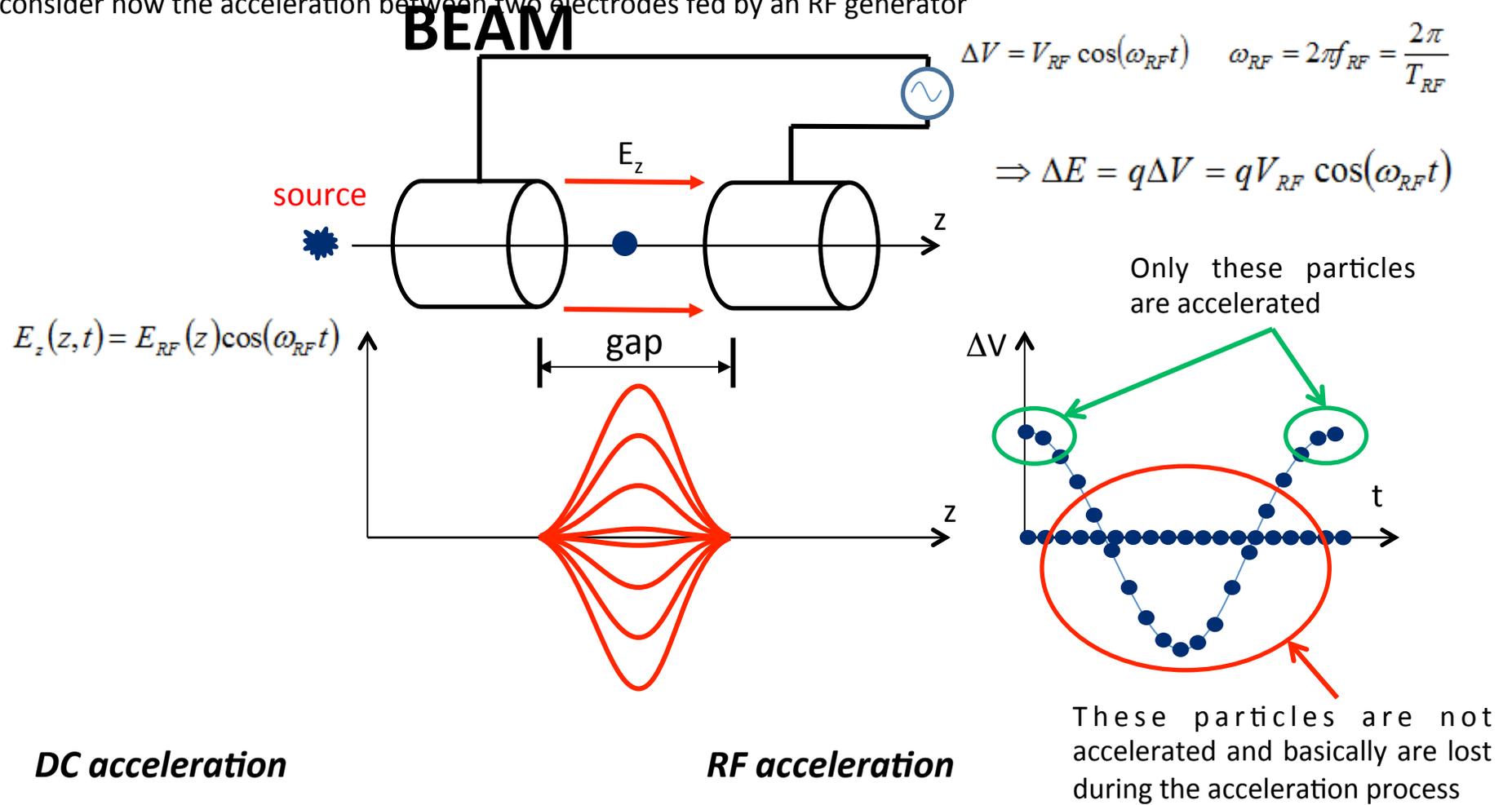
rate of energy gain per unit length

$$\Rightarrow \Delta E = \int_{\text{gap}} \frac{dE}{dz} dz = \int_{\text{gap}} qE_z dz \Rightarrow \boxed{\Delta E = q\Delta V}$$

energy gain per electrode

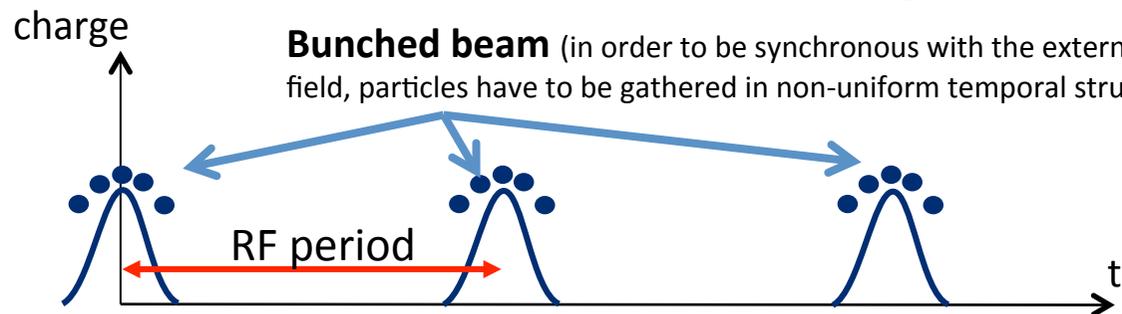
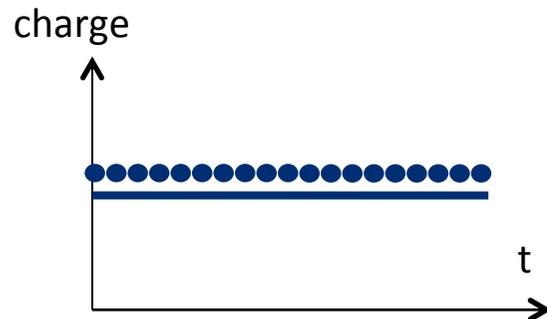
# RF ACCELERATION: BUNCHED

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



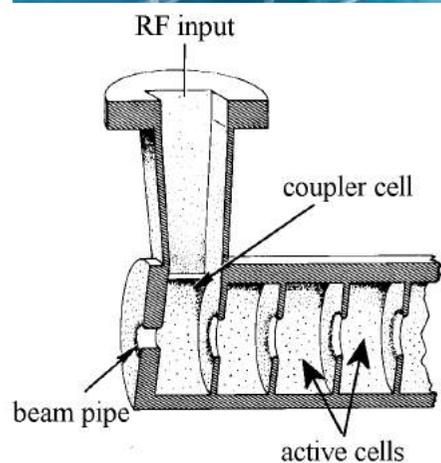
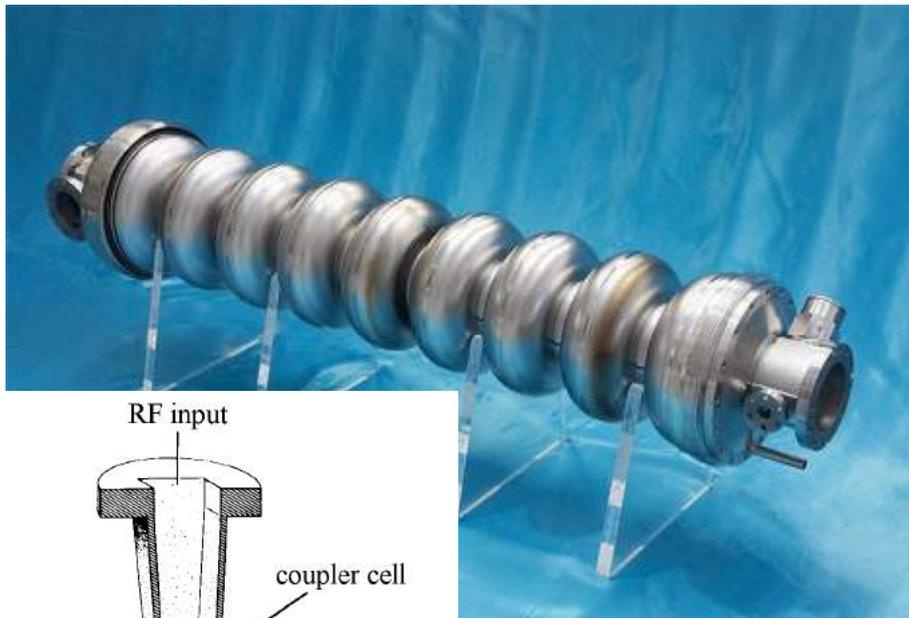
**DC acceleration**

**RF acceleration**



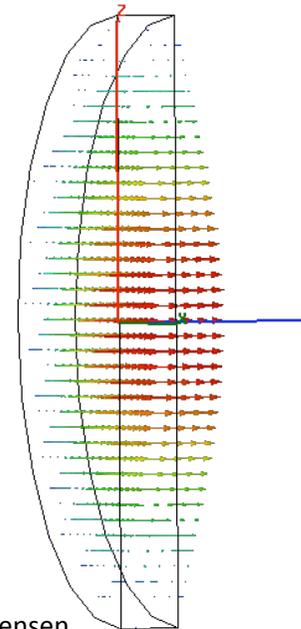
# Cavità a Radiofrequenza

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).



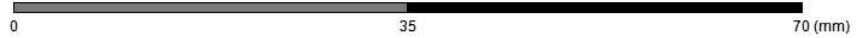
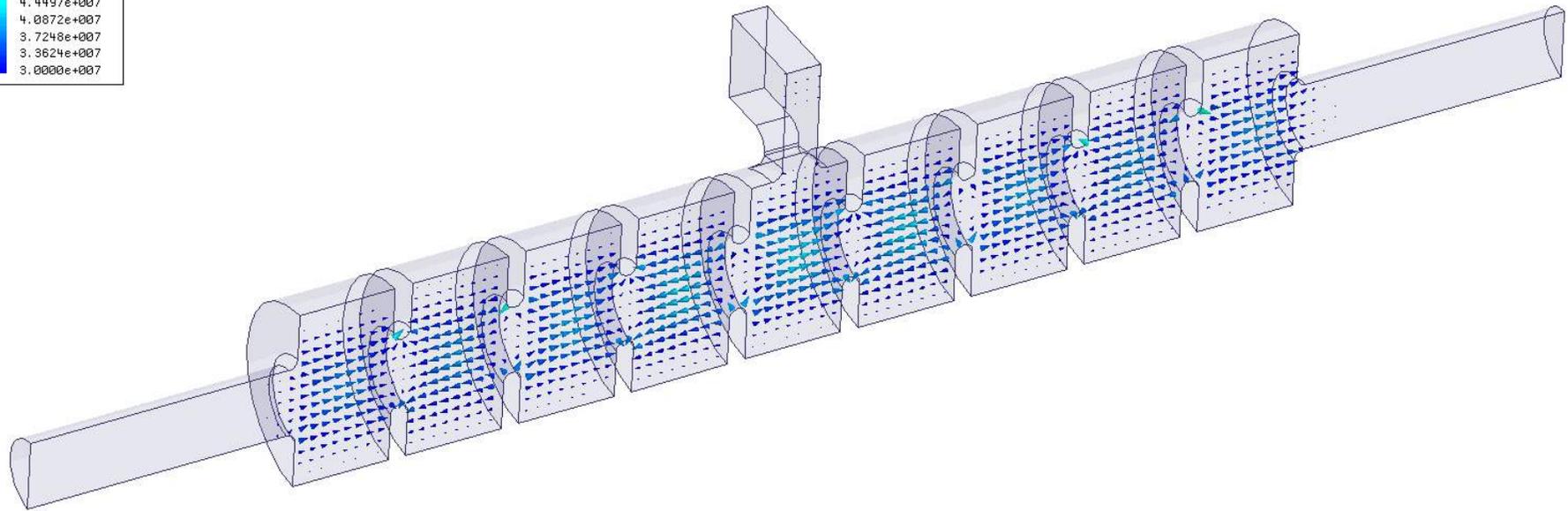
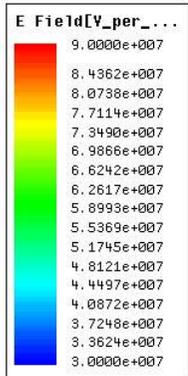
Esistono sia cavità che operano a **temperatura ambiente** (tipicamente in rame) che **cavità superconduttive** che operano a qualche K.

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

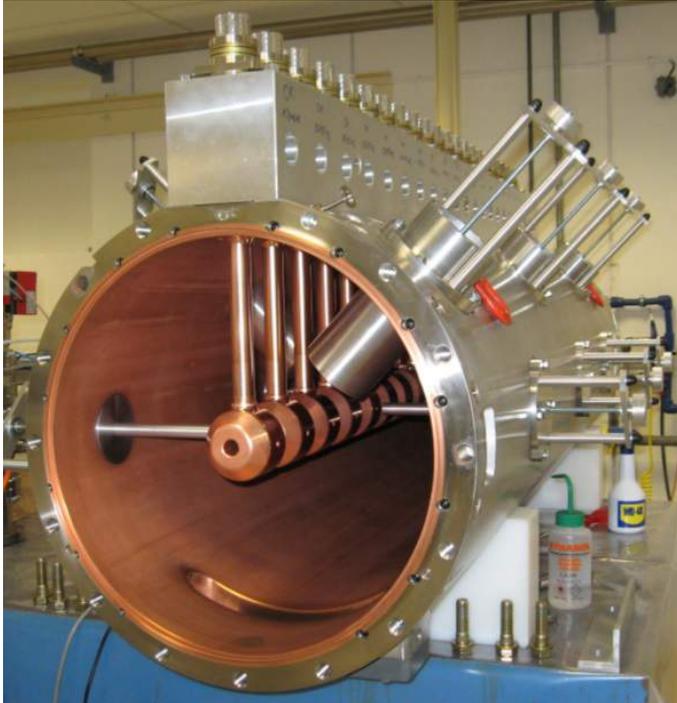
Le **frequenze di lavoro** possono andare dal MHz alla decina di GHz a seconda delle applicazioni



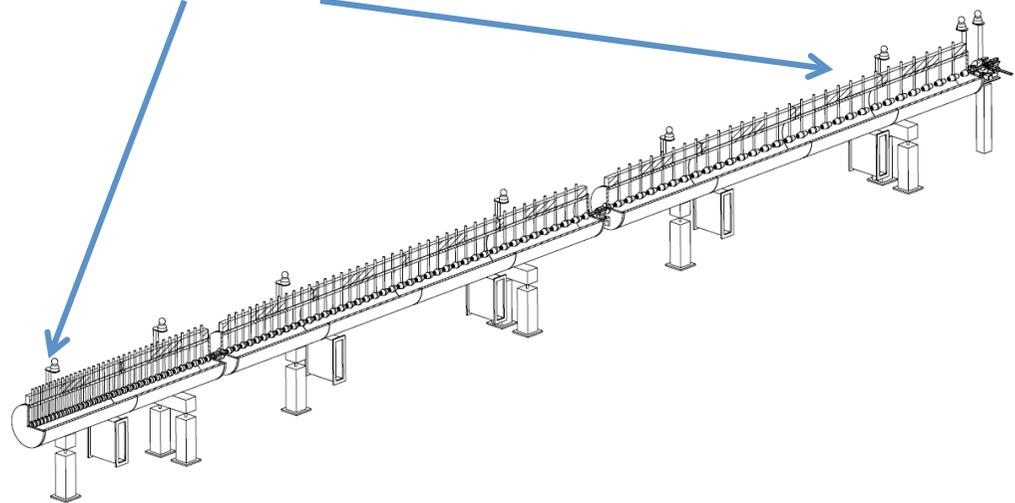
# ALVAREZ STRUCTURES: EXAMPLES



CERN LINAC 2 tank 1:  
200 MHz 7 m x 3 tanks, 1 m  
diameter, final energy 50 MeV.



CERN LINAC 4: 352 MHz frequency, Tank diameter 500 mm, 3 resonators (tanks), Length 19 m, 120 Drift Tubes, Energy: 3 MeV to 50 MeV,  $\beta=0.08$  to 0.31  $\rightarrow$  cell length from 68mm to 264mm.



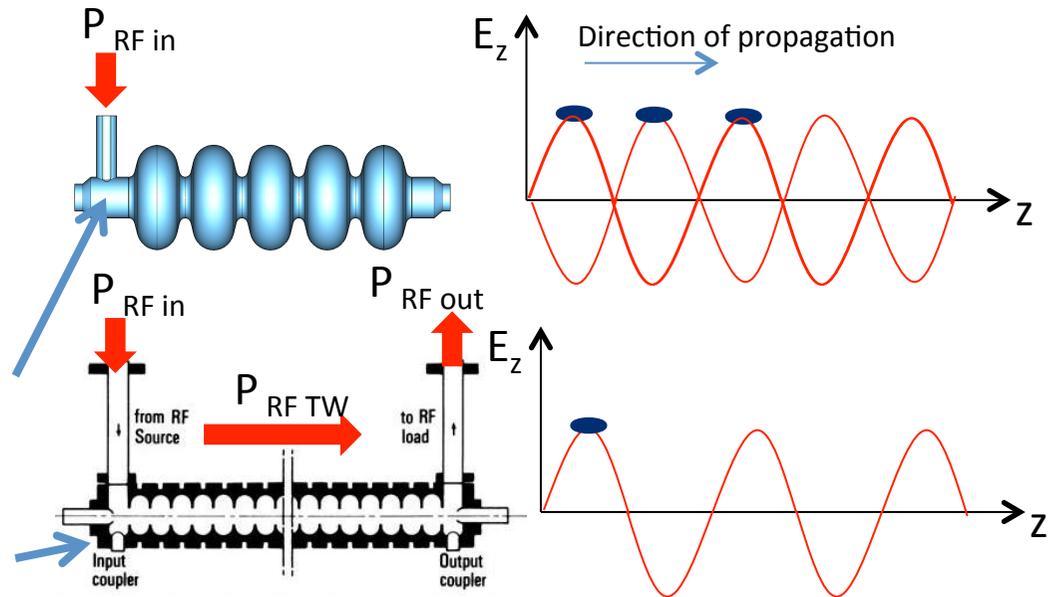
# SW AND TW ACCELERATING CAVITIES

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

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)** TM<sub>010</sub>-like modes in a **resonant cavity** (or multiple resonant cavities) in which the beam is synchronous with the resonating field;

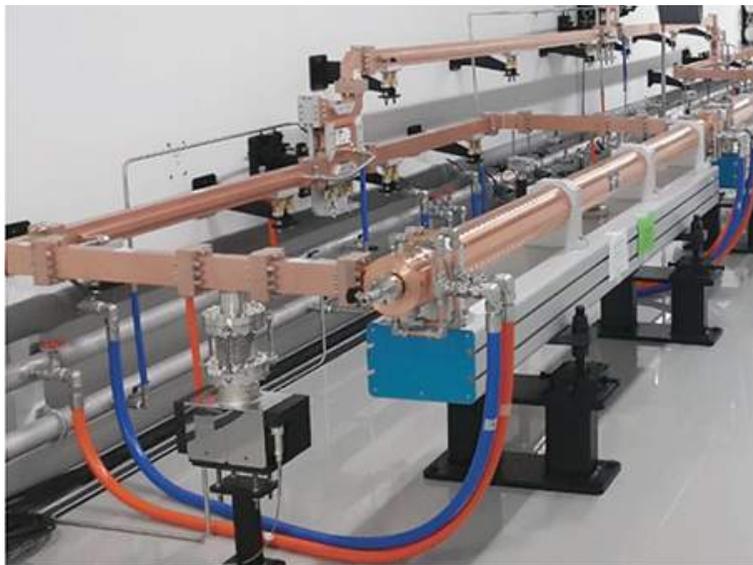
2-Using a **travelling wave (TW) disk loaded** structure operating on the TM<sub>01</sub>-like mode in which the RF wave is co-propagating with the beam with a phase velocity equal to the beam velocity ( $c$  for  $e^-$ ).



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

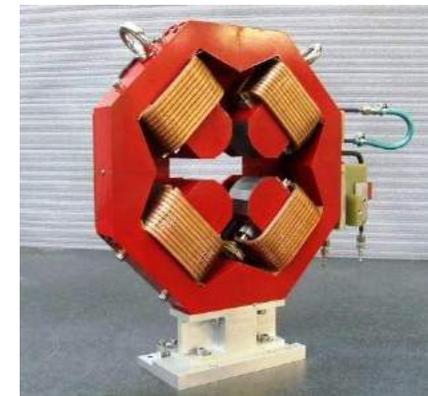
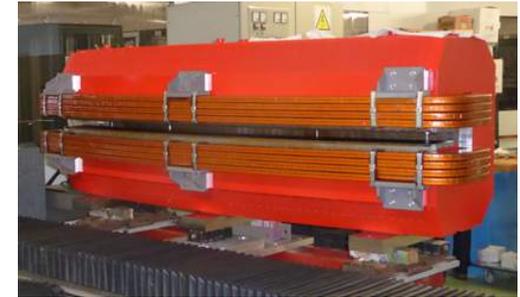
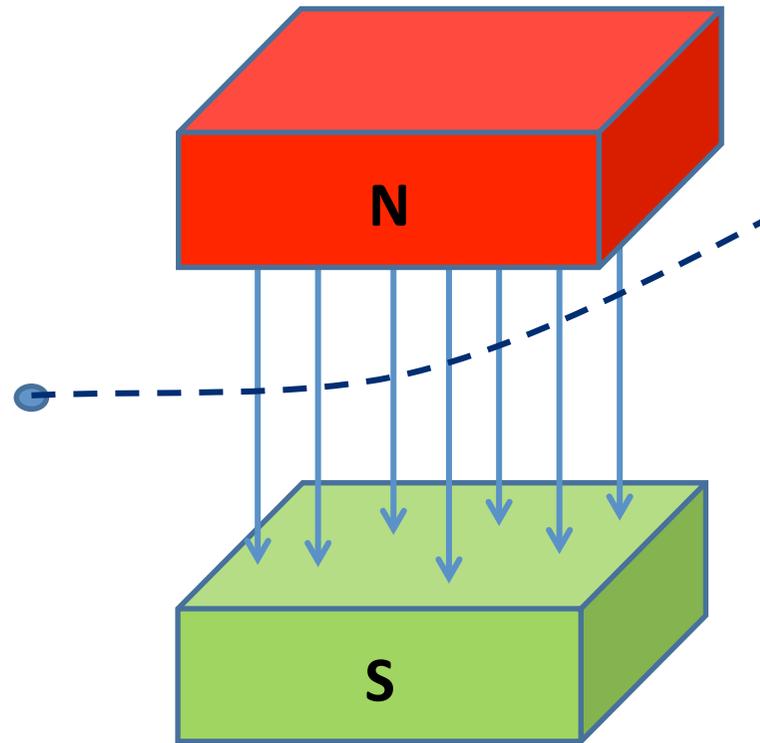
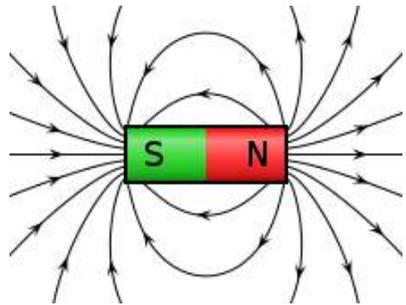
⇒The cavities (and the related LINAC technology) can be of different material:

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



# COME SI CURVANO LE PARTICELLE: CAMPI MAGNETICI

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



QUADRUPOLO

Quando una **particella 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

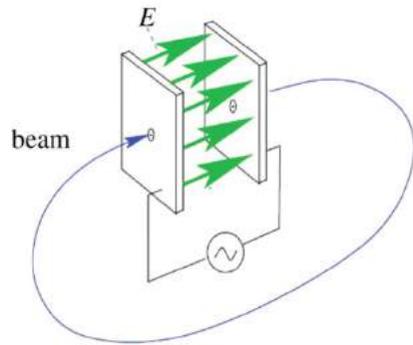
Particles are accelerated through electric field and are bended and focalized through magnetic field. The basic equation that describe the acceleration/bending /focusing processes is the **Lorentz Force**.

$\vec{p}$  = momentum  
 $m$  = mass  
 $\vec{v}$  = velocity  
 $q$  = charge

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

## ACCELERATION

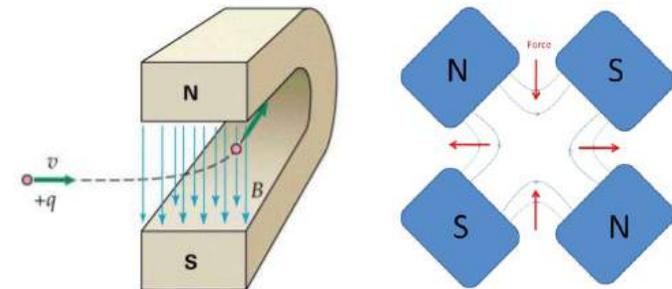
To accelerate, we need a force in the direction of motion



Longitudinal Dynamics

## BENDING AND FOCUSING

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



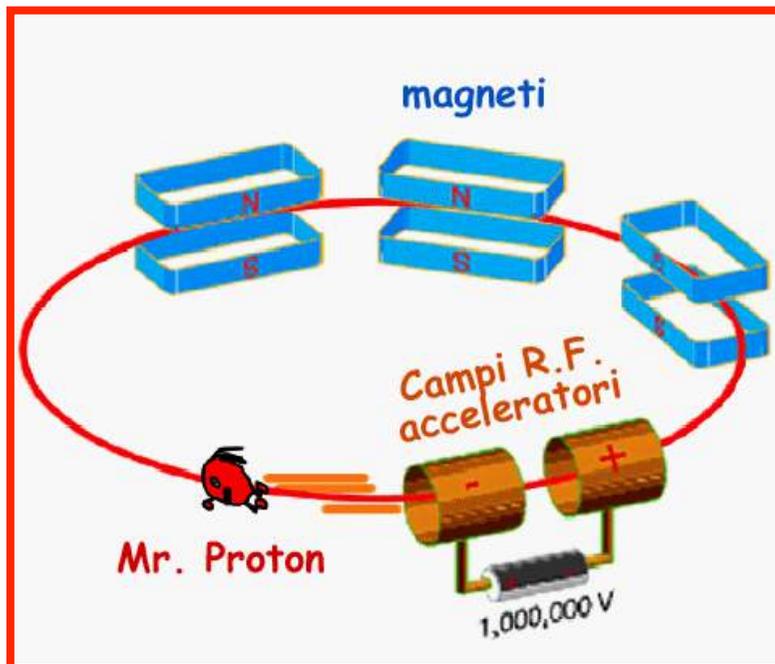
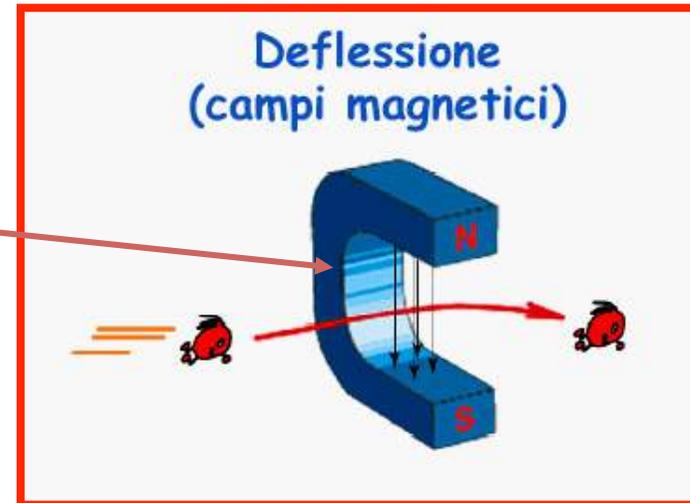
Transverse Dynamics

# 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

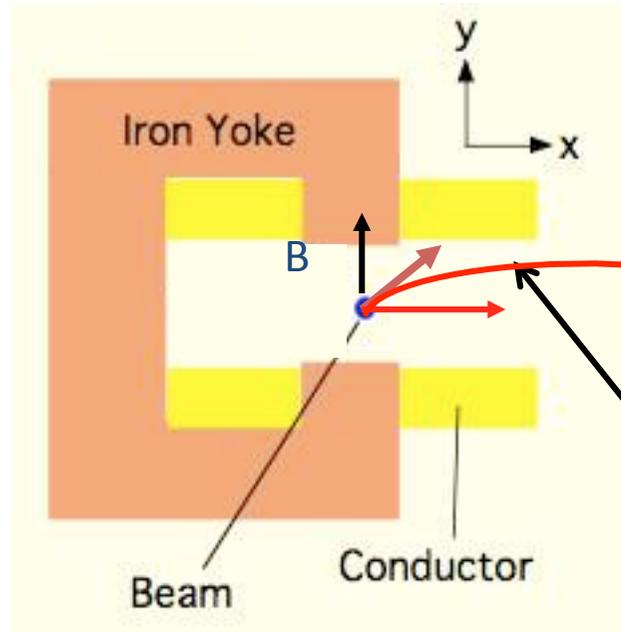
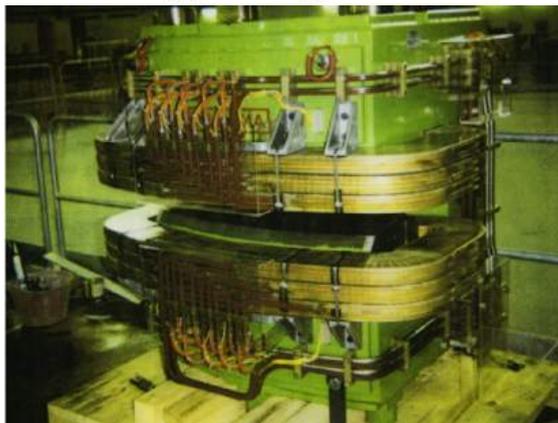
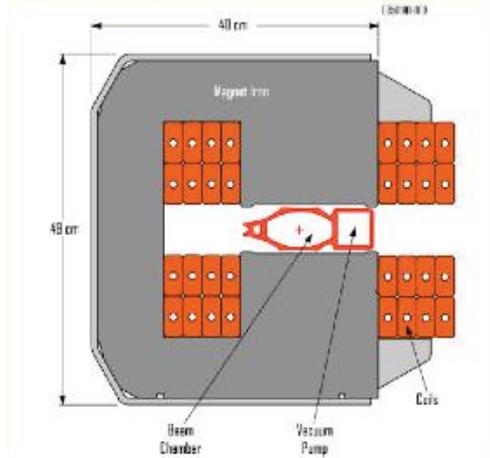


Particelle che viaggiano in un **acceleratore lineare** attraversano **una sola volta** la struttura accelerante mentre in un acceleratore **circolare** attraversano **più volte** la stessa cavità.

**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).

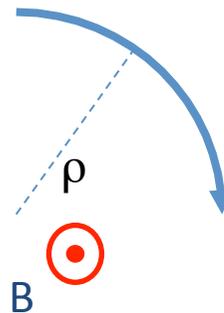


Traiettoria circolare

Raggio di curvatura

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

Per particelle ultra-relativistiche

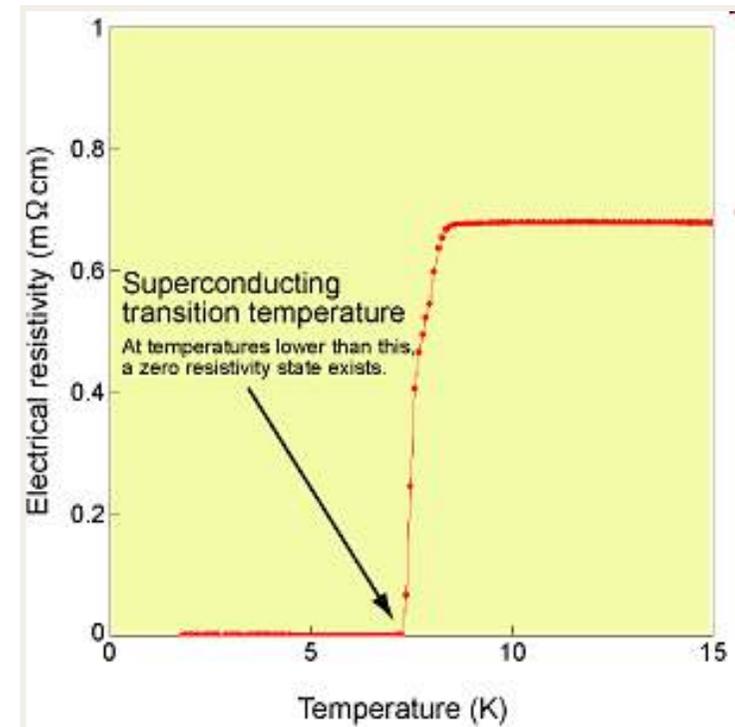


I dipoli elettromagnetici vengono usati per produrre  $B$  non oltre 1-2 T. Per campi magnetici più intensi si ricorre a **magneti superconduttori**

# 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

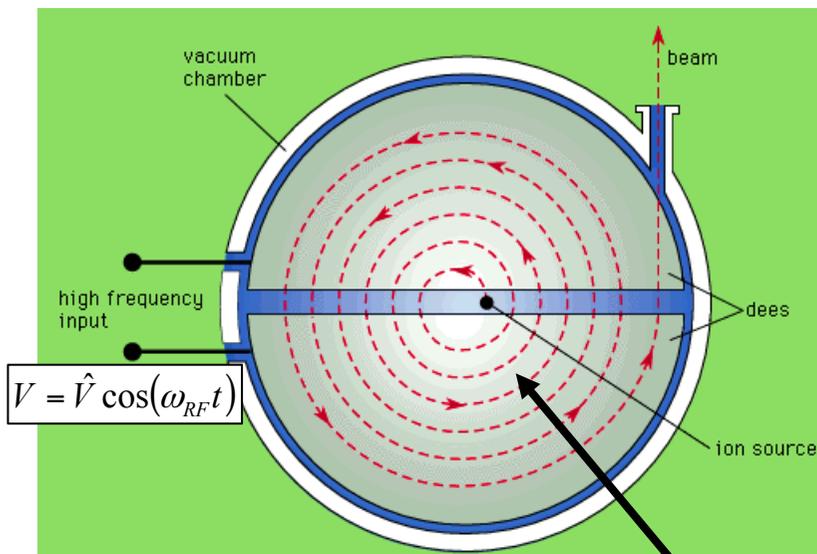
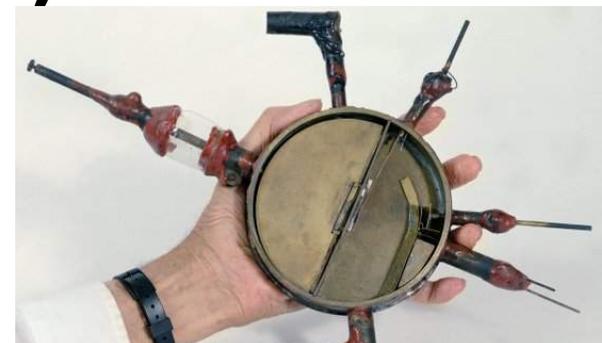


Basse temperature: 2 Kelvin = -271° C

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

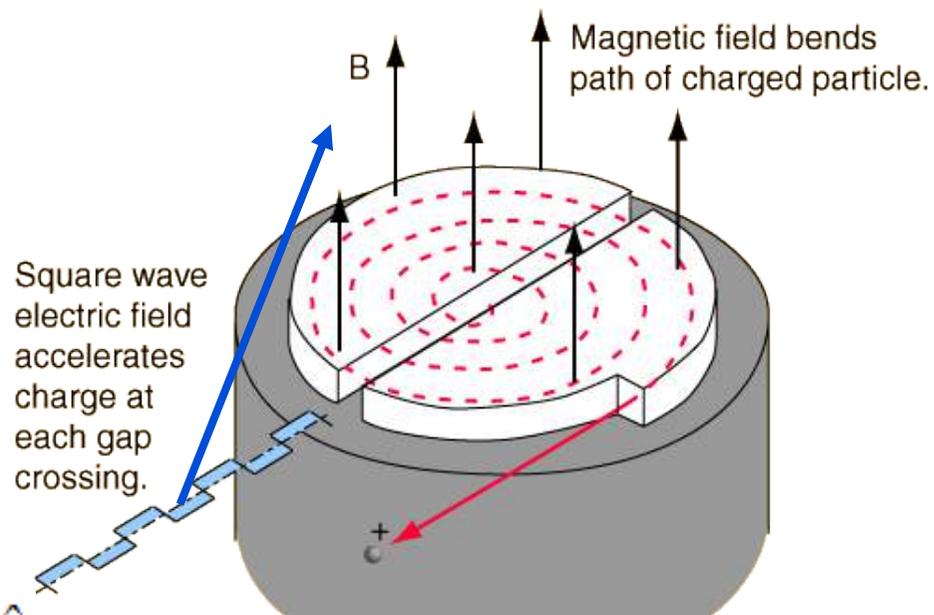
# Ciclotroni (1/2)

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)



Traiettoria a spirale  $\rho = \frac{mv}{qB}$

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



$$\Delta E = q\hat{V}$$

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* ( $m=m_0=\text{costante}$ )

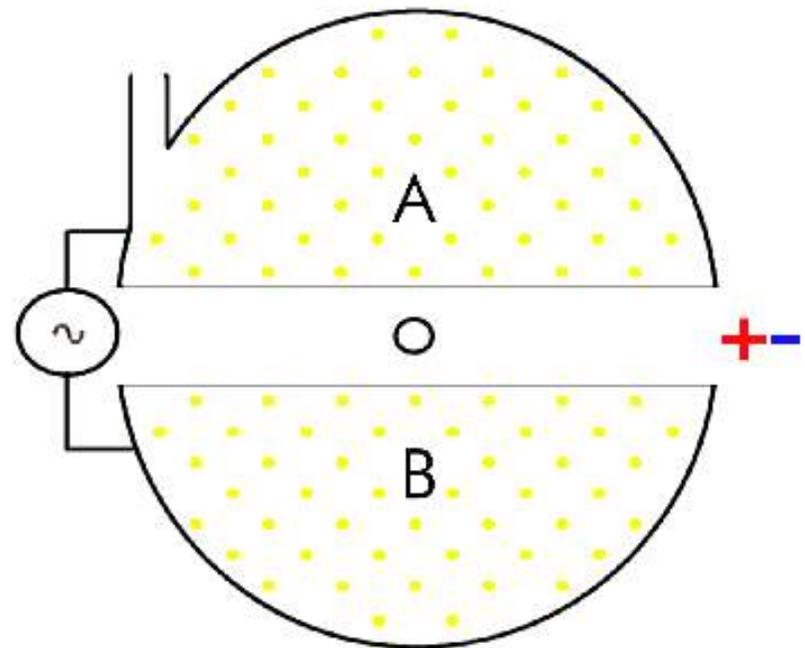
# Ciclotroni (2/2)



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**.



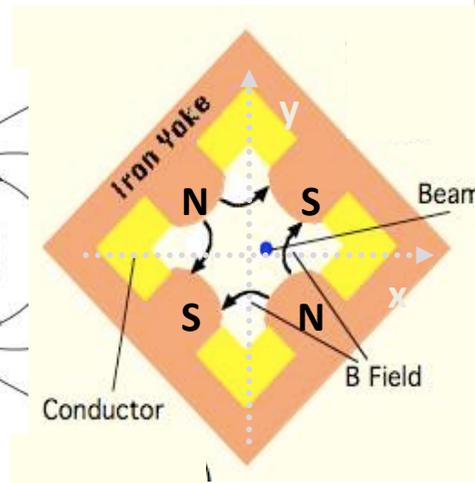
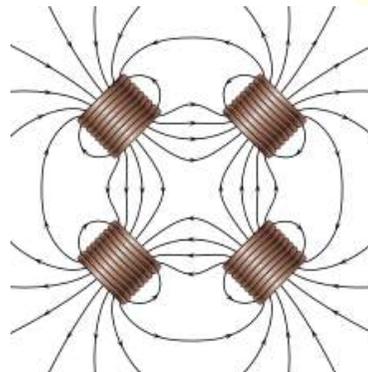
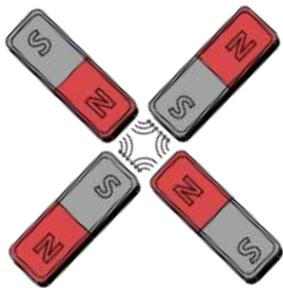
<https://youtu.be/cutKuFxeXmQ>

# 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

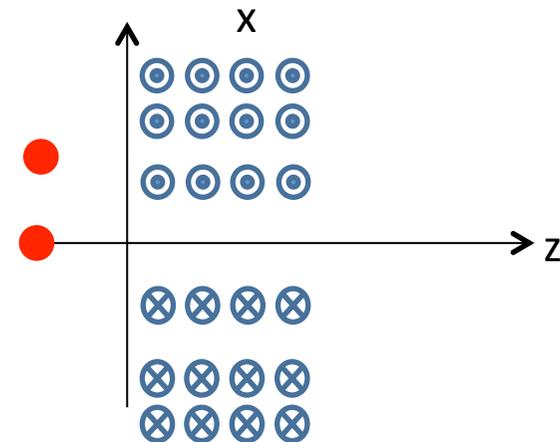
- B=0 al centro
- L'intensità di **B cresce linearmente** ed in maniera proporzionale allo spostamento rispetto all'asse di riferimento



$$B_x = g \cdot y$$

$$B_y = g \cdot x$$

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

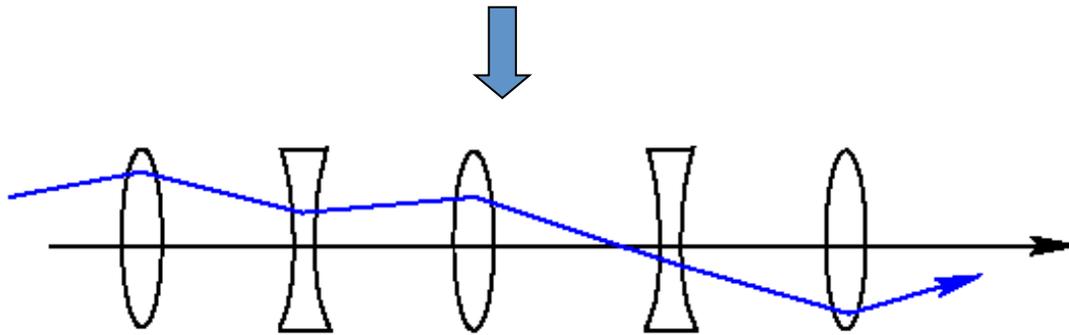


# FOCHEGGIAMENTO TRASVERSO: FUNZIONE $\beta$

Un *quadrupolo focheggia il fascio in un piano e lo defocheggia nell'altro*.

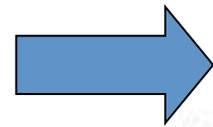
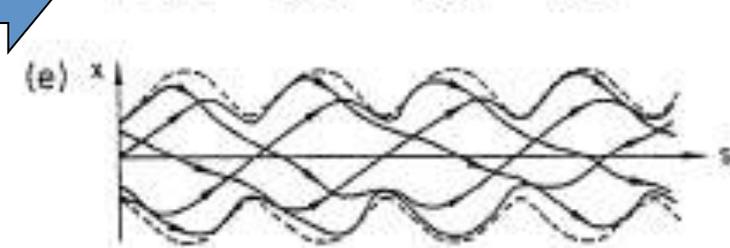
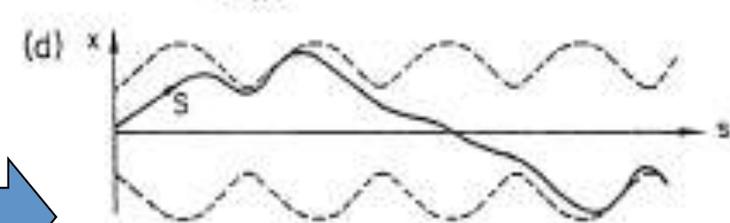
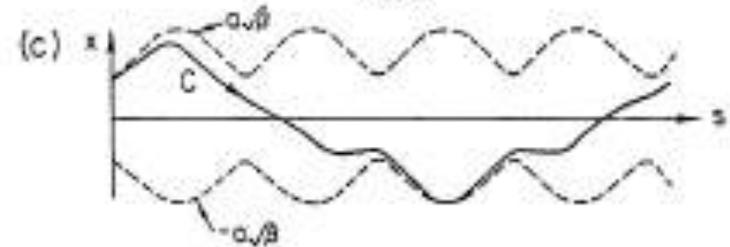
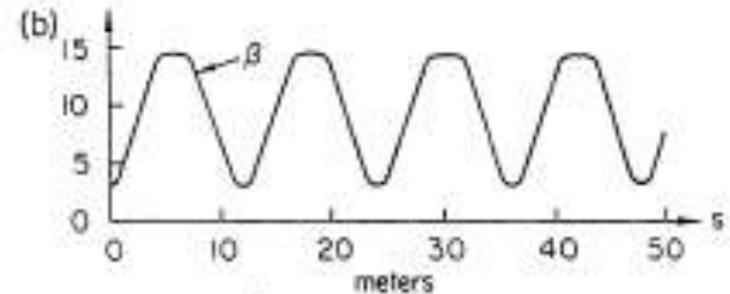
Per ottenere il *foccheggio complessivo* di un fascio di particelle lungo un canale di trasporto o in un acceleratore circolare bisogna usare una *sequenza di quadrupoli con il segno alternato*

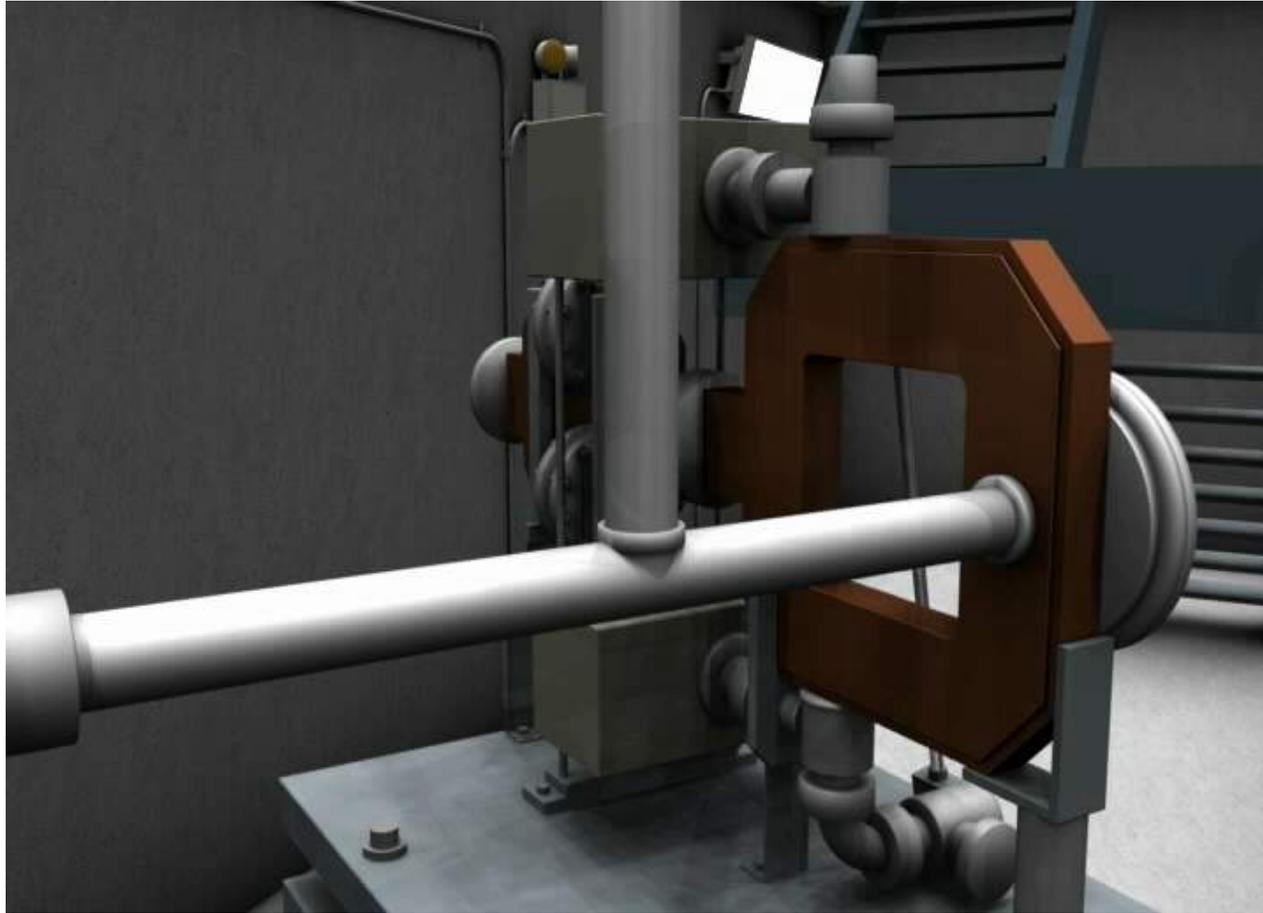
Tale configurazione è in grado di garantire traiettorie stabili.



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

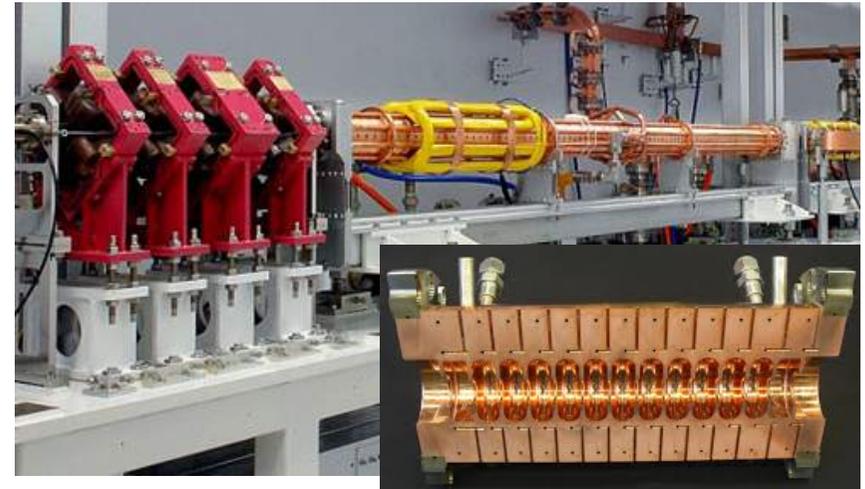
L'inviluppo all'interno del quale sono confinate tutte le particelle del pacchetto è detto **funzione  $\beta$** .





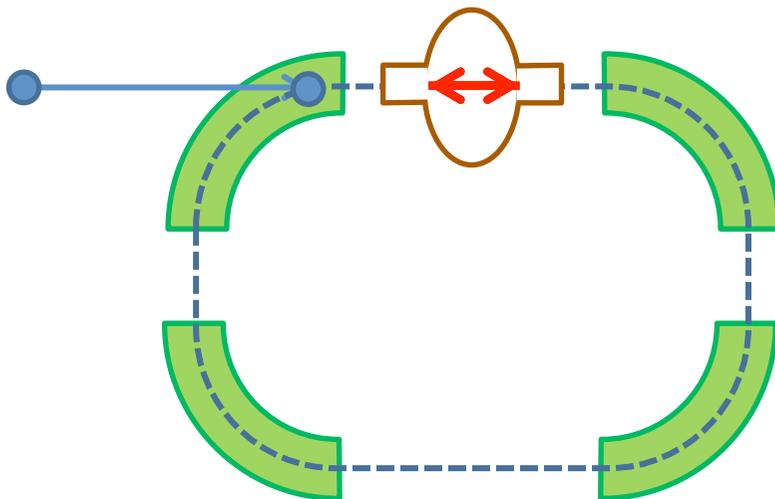
# ACCELERATORI LINEARI E SINCROTRONI

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**.

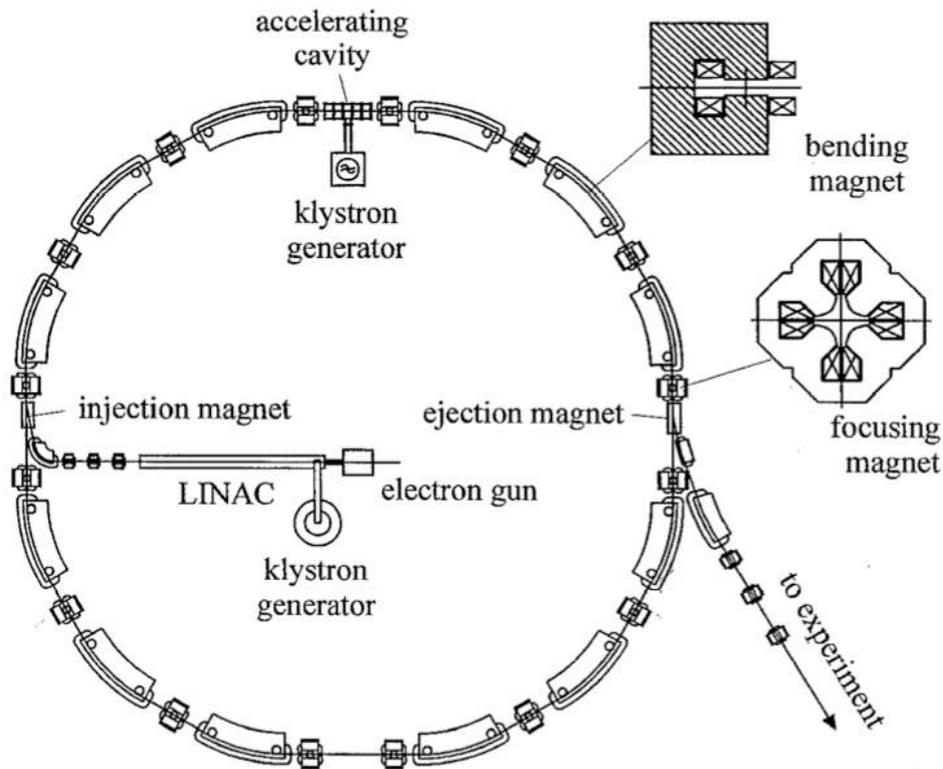


# ACCELERATORI CIRCOLARI: IL SINCROTRONE

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

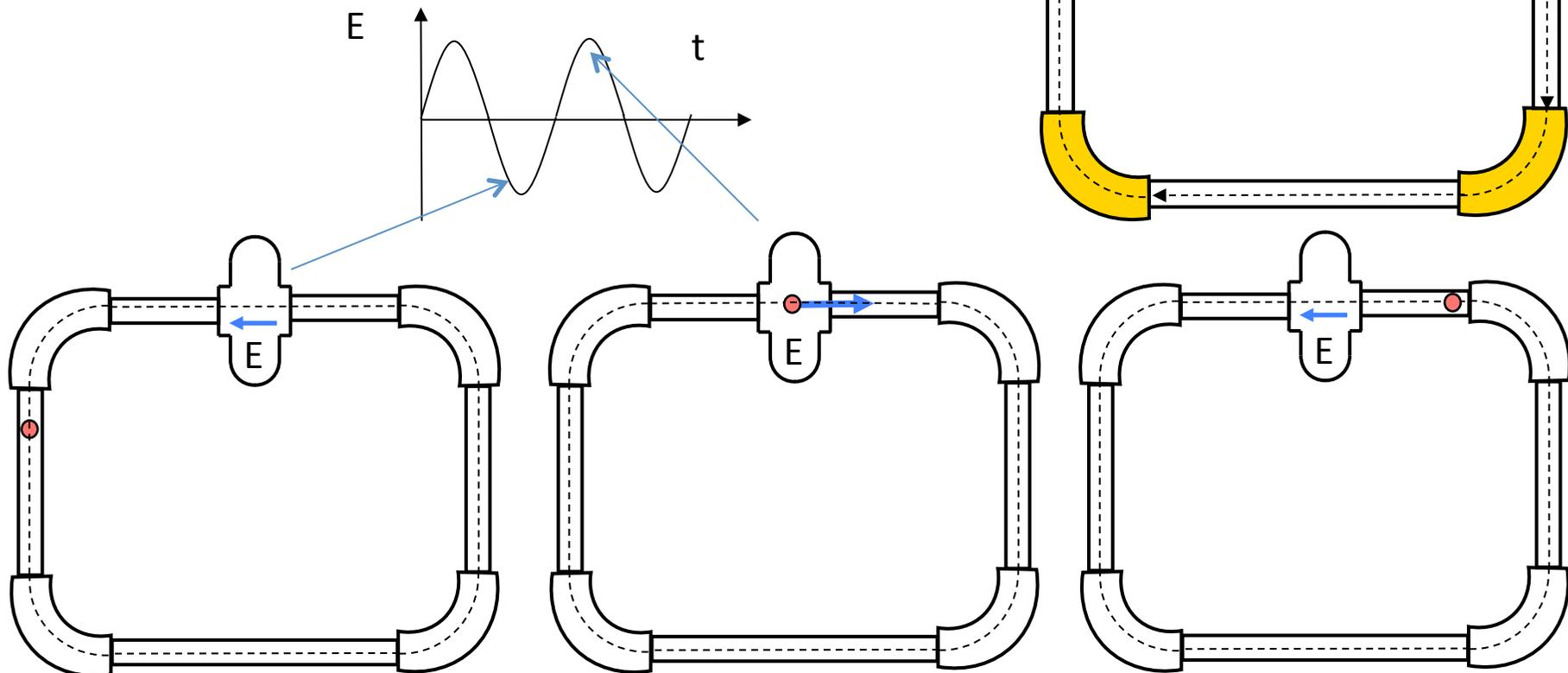
**CAMERA DA VUOTO**

**DIAGNOSTICA**

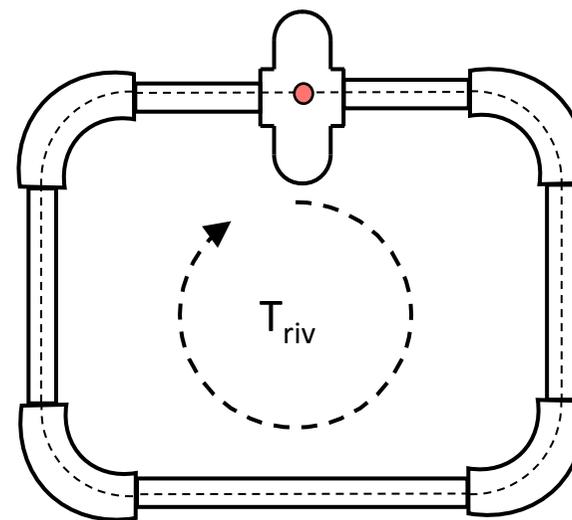
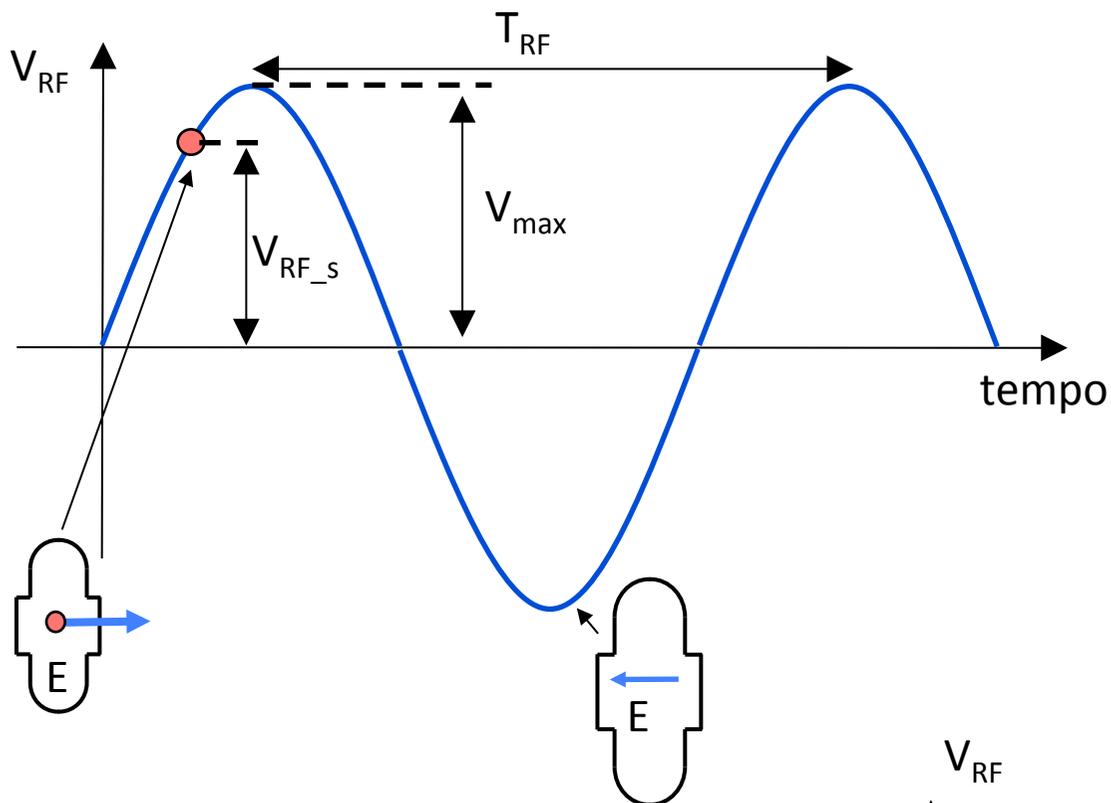


# ACCELERAZIONE IN UN SINCROTRONE

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).



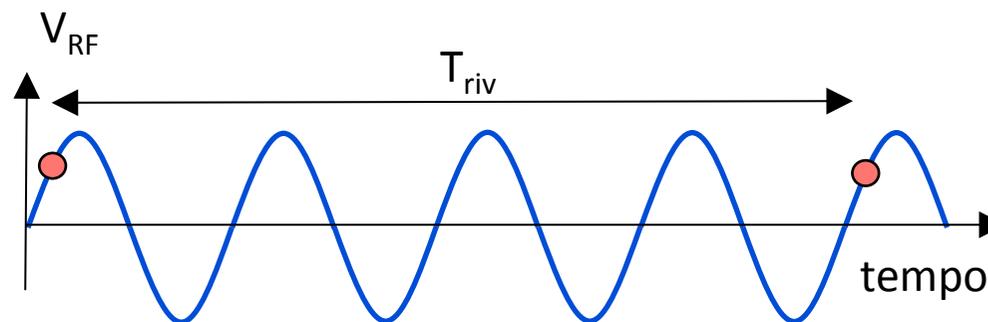
# PERIODO DI RIVOLUZIONE E NUMERO ARMONICO



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

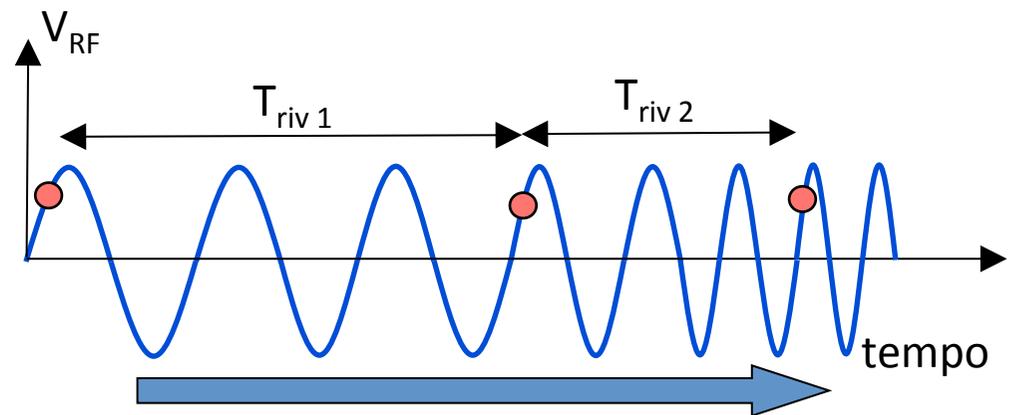
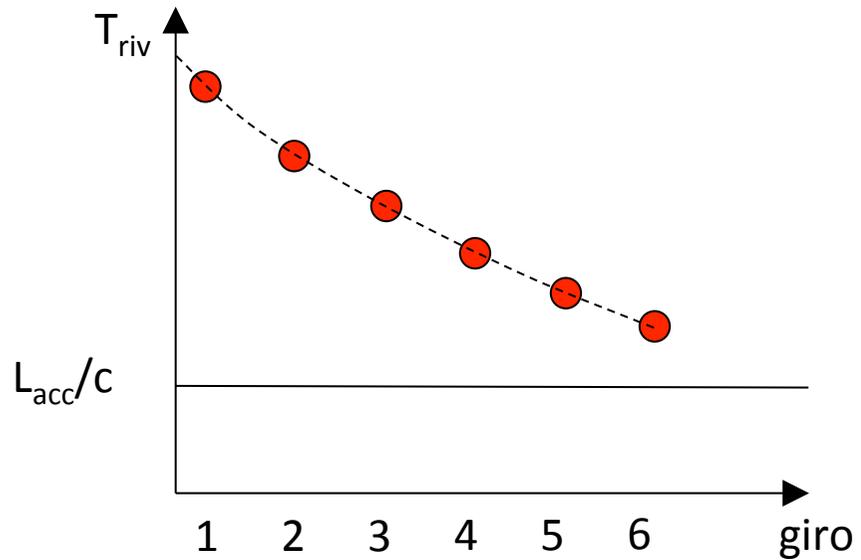
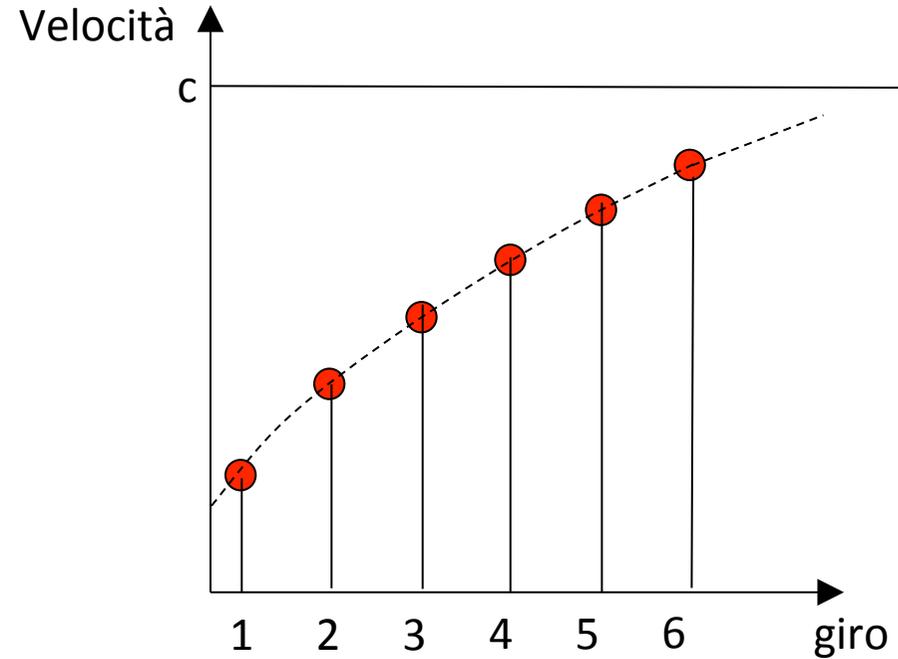
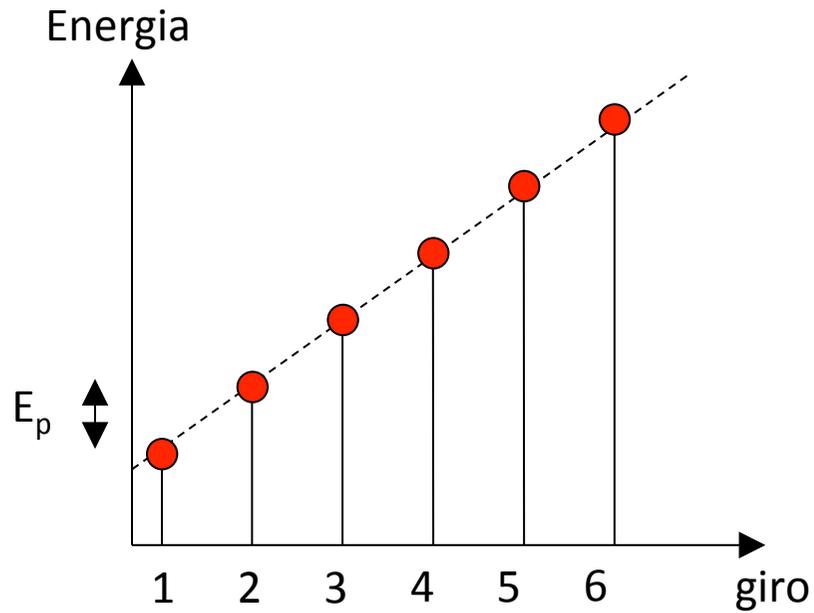
Per avere accelerazione "stabile" ovvero per fare in modo che la particella dopo un giro veda sempre la stessa tensione accelerante in cavità, il periodo di rivoluzione ( $T_{riv}$ ) deve essere un multiplo intero ( $h$ ) del periodo di radiofrequenza ( $T_{RF}$ ) ad ogni giro.

$h$  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

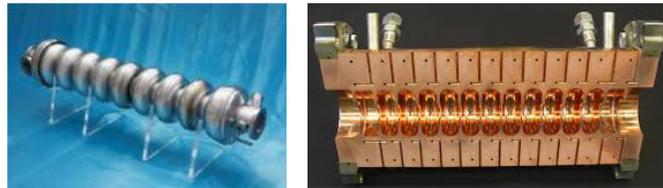
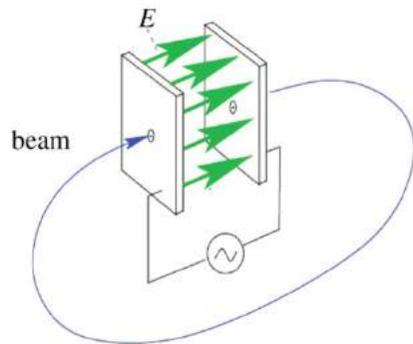
Particles are accelerated through electric field and are bended and focalized through magnetic field. The basic equation that describe the acceleration/bending /focusing processes is the **Lorentz Force**.

$\vec{p}$  = momentum  
 $m$  = mass  
 $\vec{v}$  = velocity  
 $q$  = charge

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

## ACCELERATION

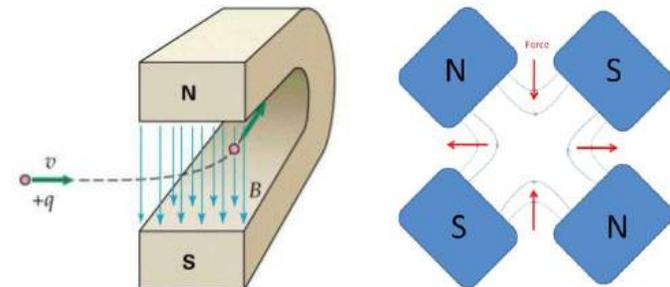
To accelerate, we need a force in the direction of motion



Longitudinal Dynamics

## BENDING AND FOCUSING

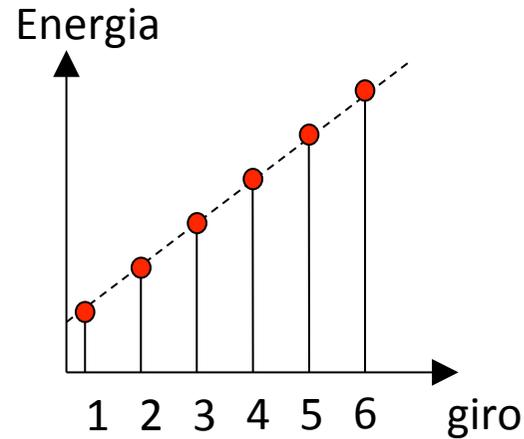
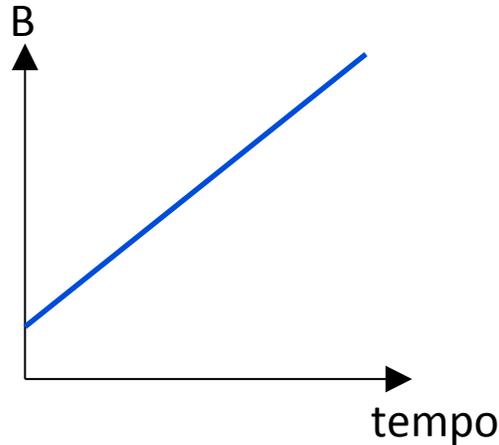
2<sup>nd</sup> term always perpendicular to motion => no energy gain



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.



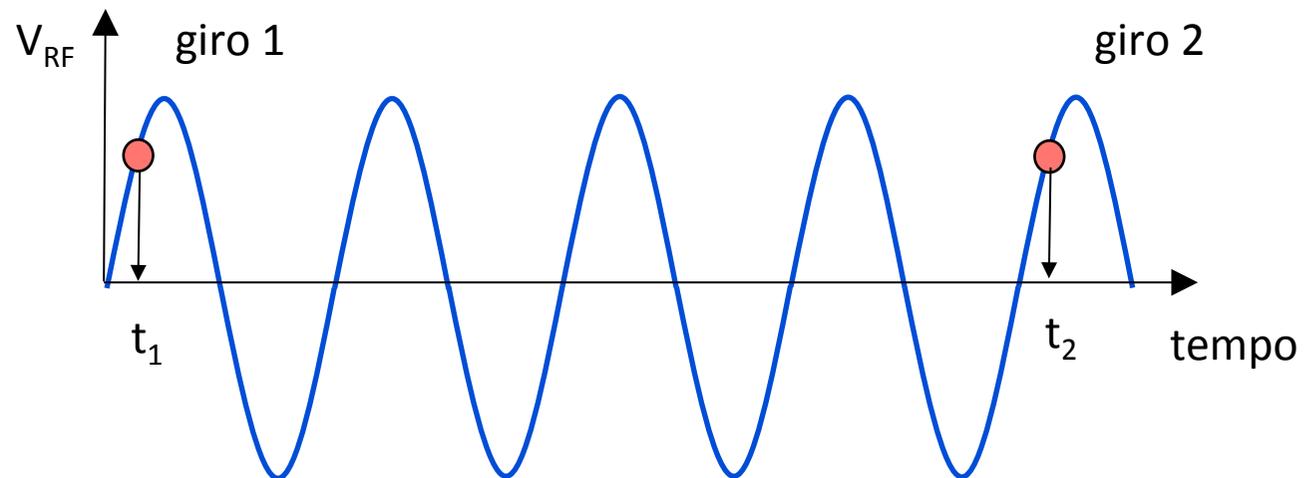
$$R \propto \frac{E_{particella}}{B}$$

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.



# PARTICELLE NON-SINCRONE

Il moto di una particella **non** sincrona, ("vicina" in posizione ed energia) alla particella sincrona può essere descritto utilizzando le seguenti quantità:

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

Tempo di arrivo in cavità della particella sincrona al giro n

$$t - t_s = \tau$$

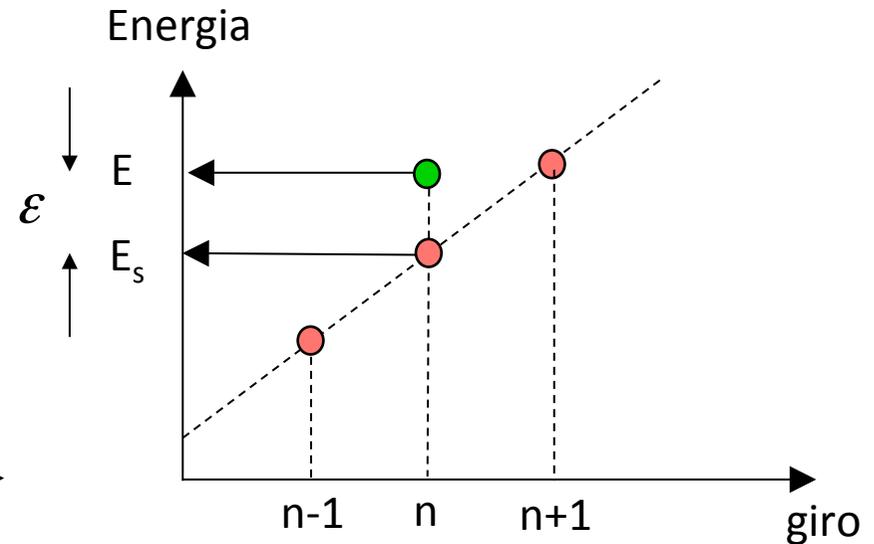
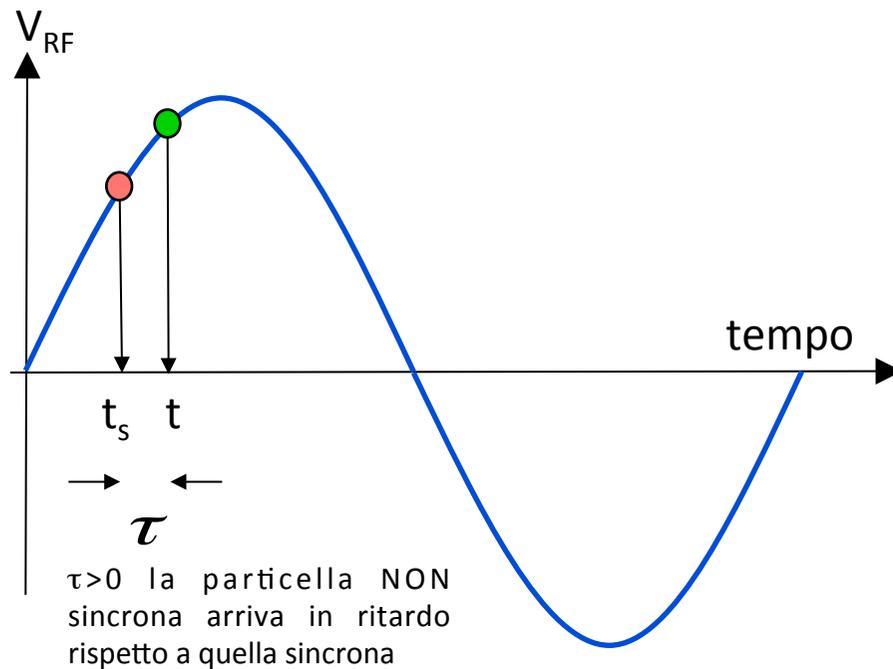
Differenza tra i due tempi di arrivo al giro n

Energia della particella NON sincrona al giro n

Energia della particella sincrona al giro n

Differenza tra le due energie al giro n

$$E - E_s = \varepsilon$$



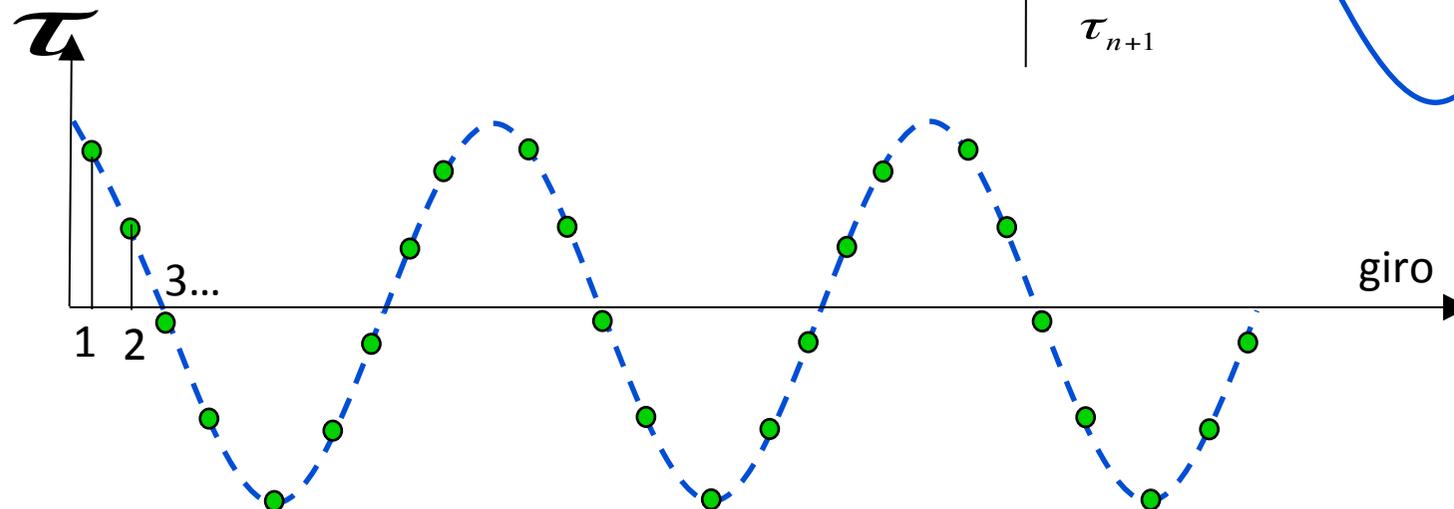
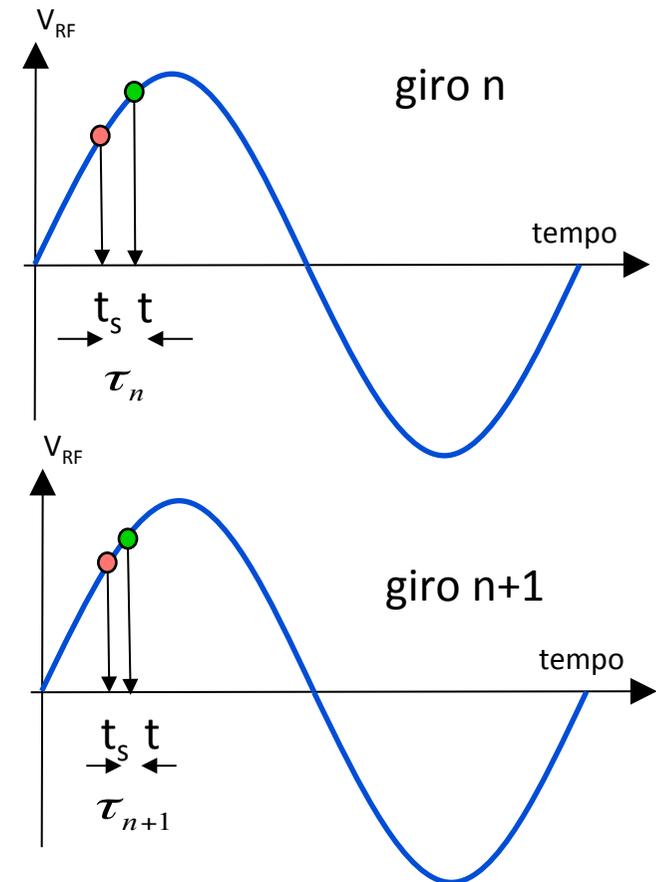
# OSCILLAZIONI DI SINCROTRONE

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.

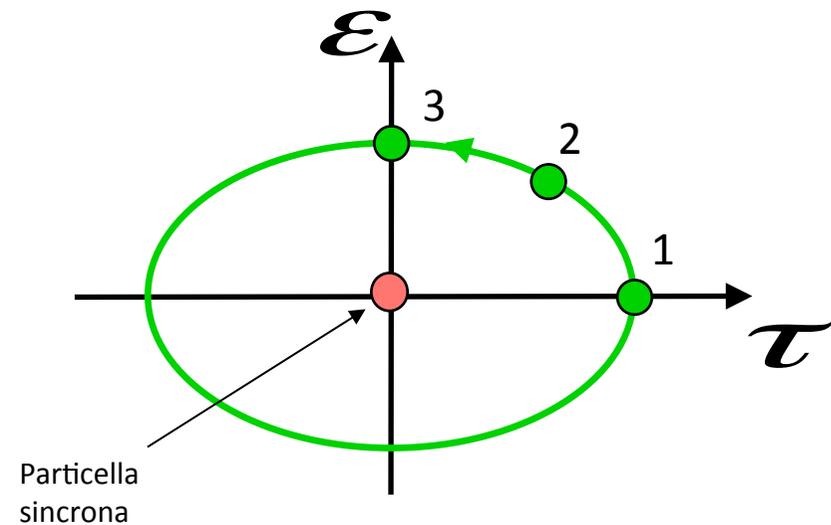
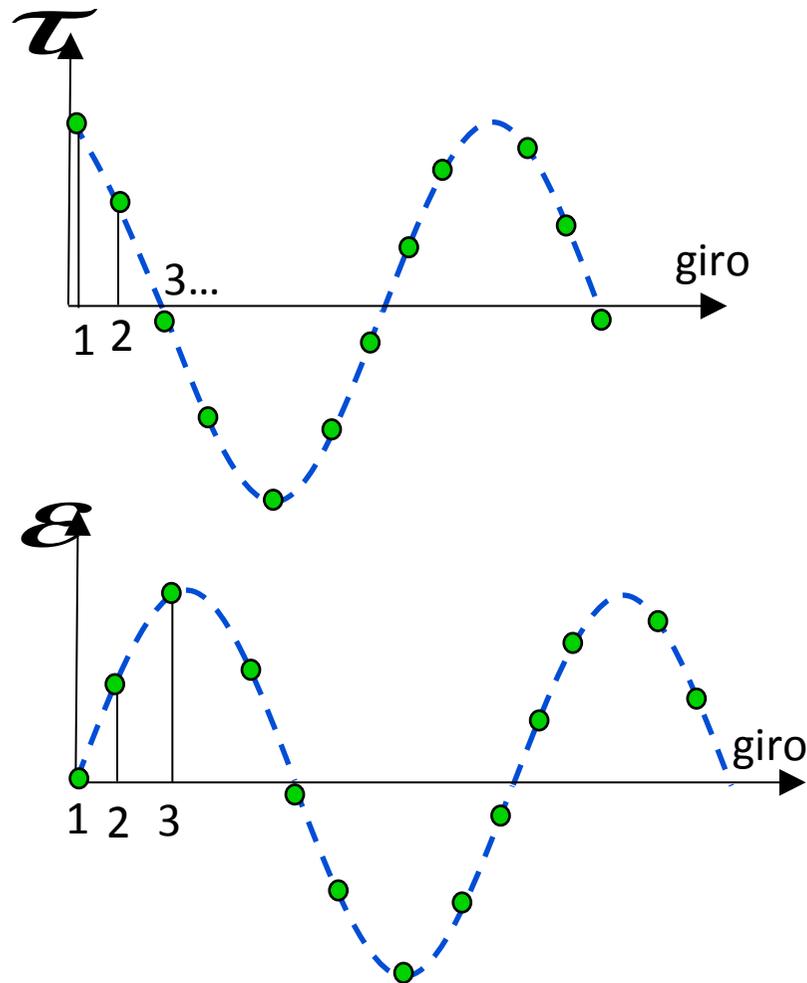
A questa maggiore accelerazione corrisponde un aumento di velocità e, quindi, al giro successivo la particella NON sincrona avrà **recuperato parte del suo "svantaggio"** rispetto a quella sincrona e si troverà più vicina. Viceversa se una particella arriva prima della particella sincrona in cavità vede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

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



# OSCILLAZIONI DI SINCROTRONE NELLO SPAZIO DELLE FASI

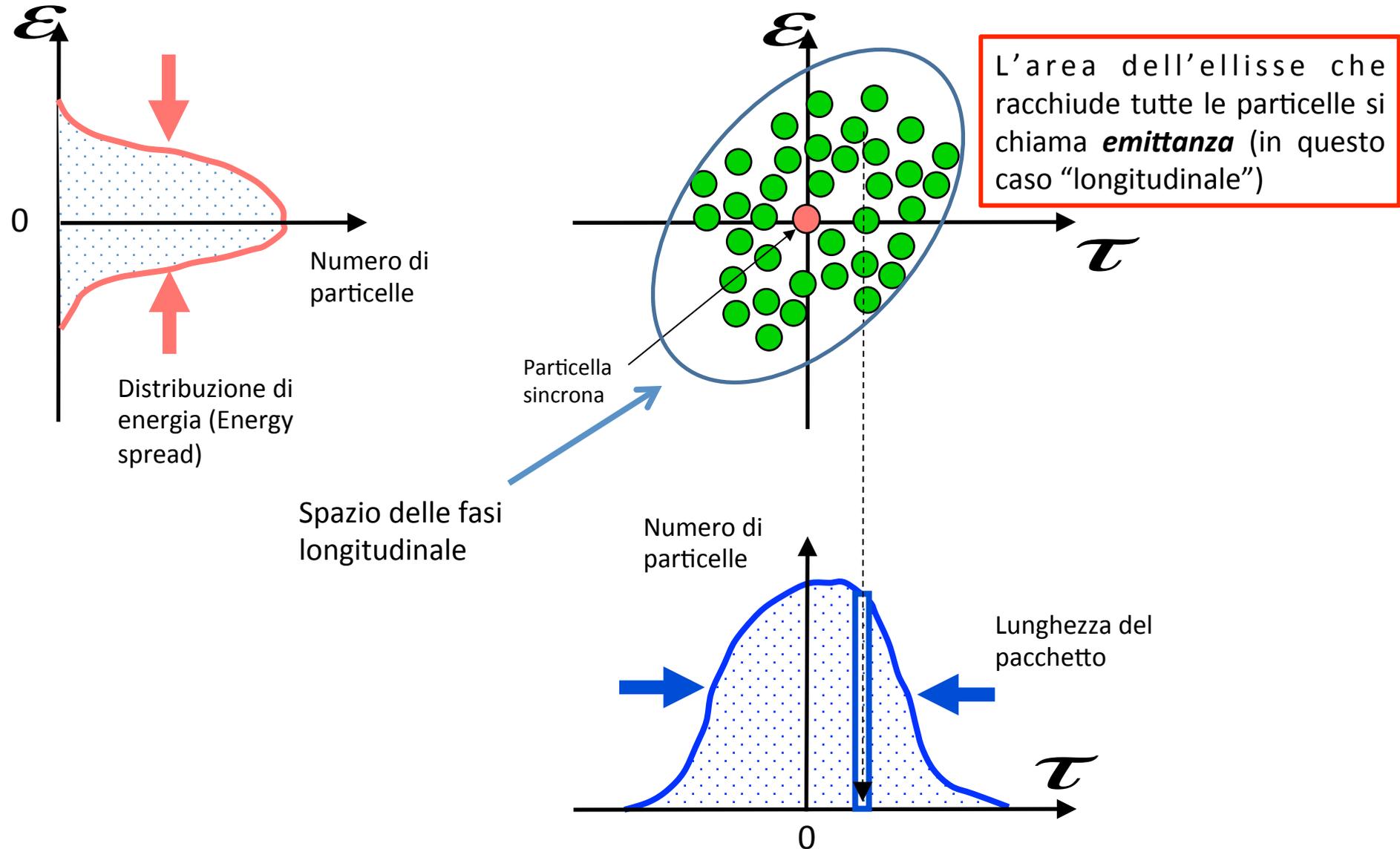
Alle oscillazioni in posizione attorno alla particella sincrona corrispondono oscillazioni in energia.



Nel piano  $(\tau, E)$  detto spazio delle fasi longitudinale una particella non sincrona descrive una ellisse che percorre con una frequenza pari proprio alla frequenza di sincrotrone.

# LUNGHEZZA DEL PACCHETTO DI PARTICELLE

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

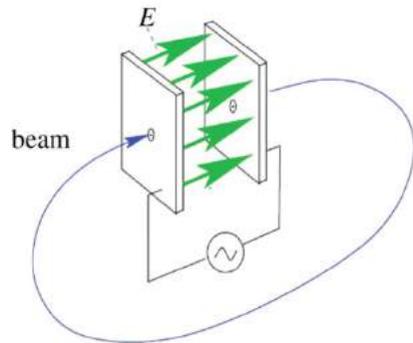
Particles are accelerated through electric field and are bended and focalized through magnetic field. The basic equation that describe the acceleration/bending /focusing processes is the **Lorentz Force**.

$\vec{p}$  = momentum  
 $m$  = mass  
 $\vec{v}$  = velocity  
 $q$  = charge

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

## ACCELERATION

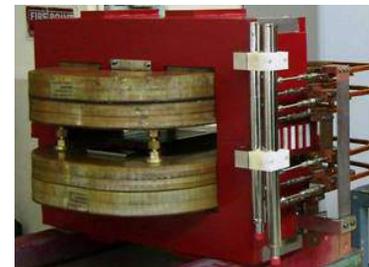
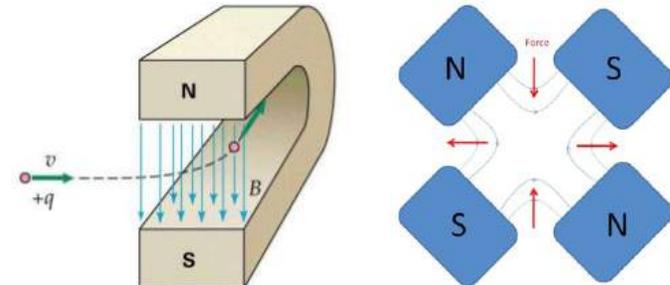
To accelerate, we need a force in the direction of motion



Longitudinal Dynamics

## BENDING AND FOCUSING

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

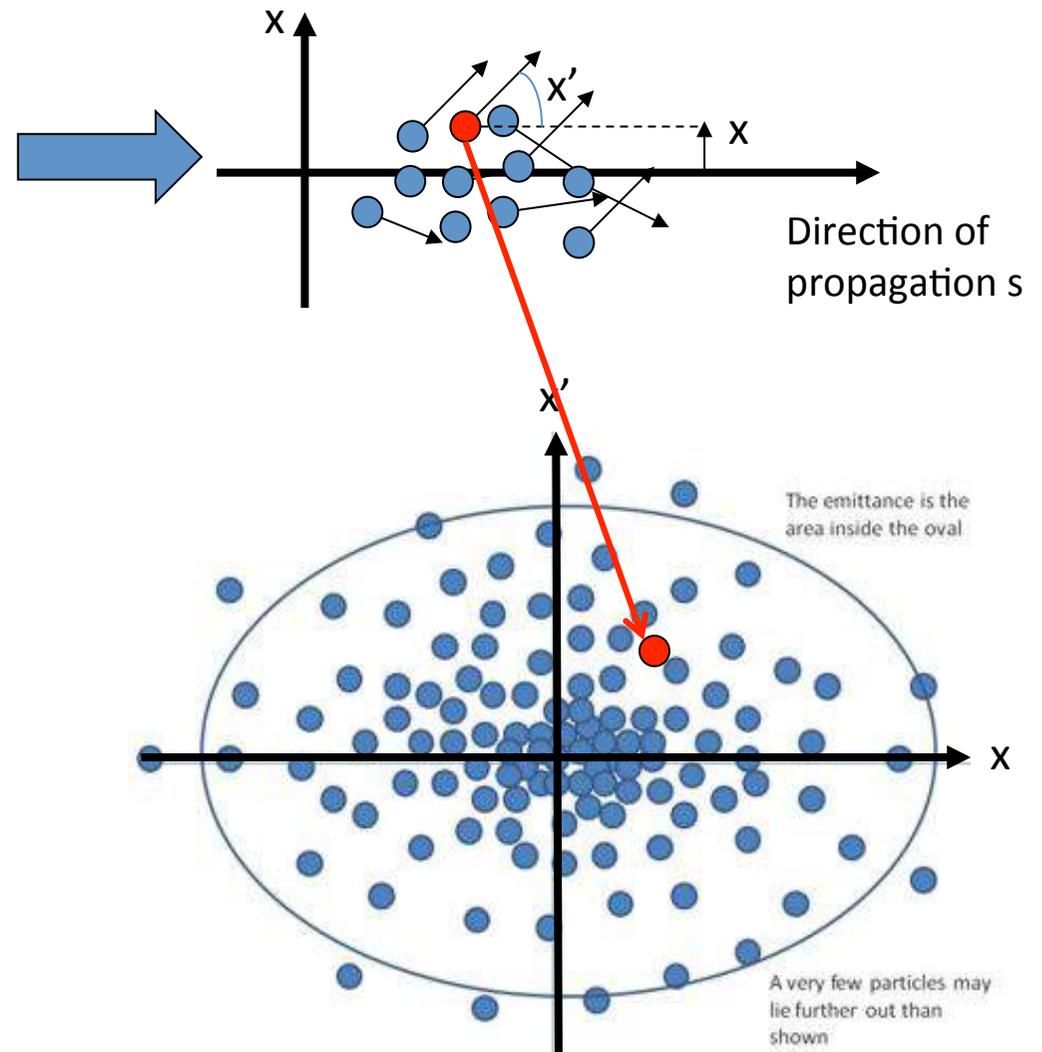
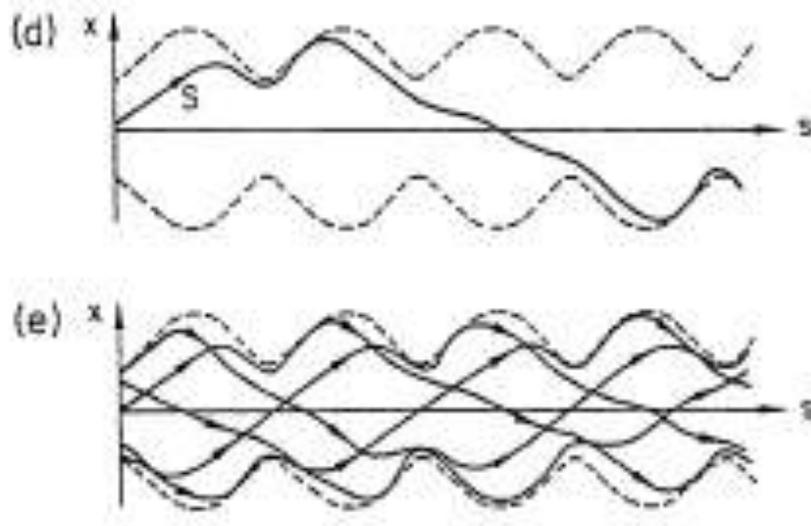


Transverse Dynamics

# TRANSVERSE PHASE SPACE AND EMITTANCE

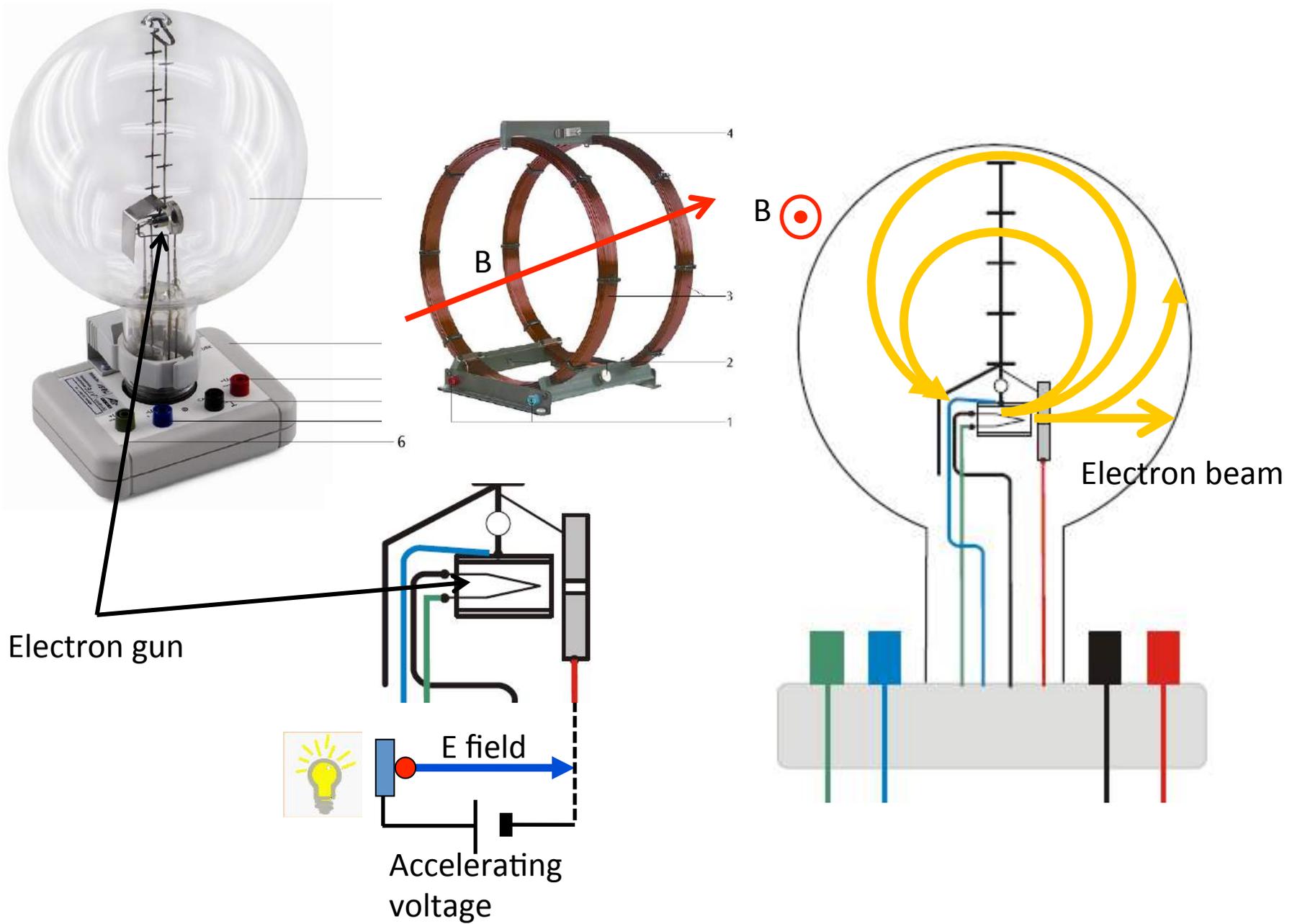
Similarly to what we have in the longitudinal plane also in the transverse plane the particles perform oscillations (called **betatron oscillations**) due to the force provided by quadrupoles.

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**

# EXPERIMENT WITH e- BEAM



# EXERCISE: CALCULATIONS

$$\Delta V = 300V$$

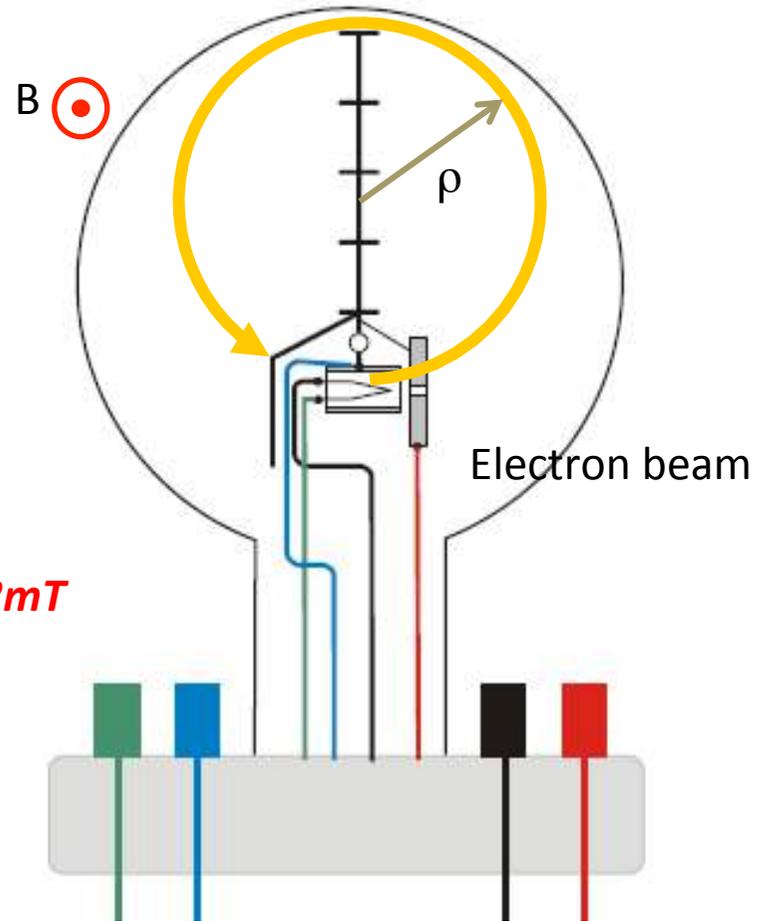
*Acceleration: calculate the particle velocity*

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

$$\beta = 0.034$$

*Deflection: calculate the radius of curvature with  $B=2\text{mT}$*

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



$$e = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$
$$m = 9.1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

# Gli acceleratori di particelle parte II

*David Alesini*

*Divisione Acceleratori*

*LNF-INFN*



# IN BREVE: COME SI ACCELERANO LE PARTICELLE

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

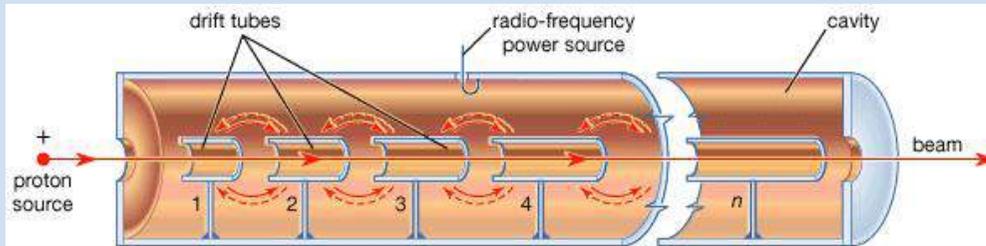
$\vec{p}$  = momentum

$m$  = mass

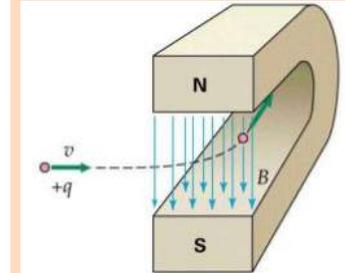
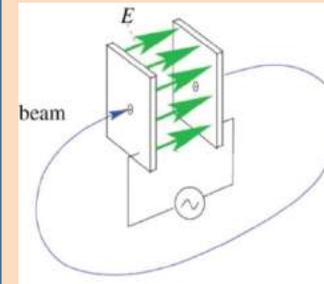
$\vec{v}$  = velocity

$q$  = charge

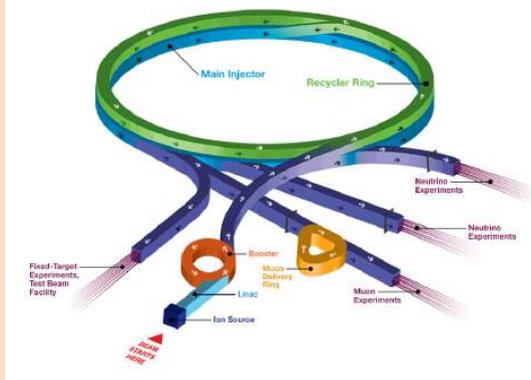
## LINEARI



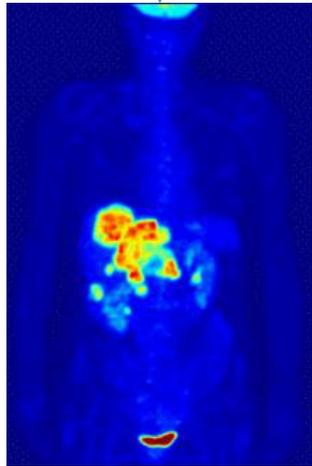
## CIRCOLARI



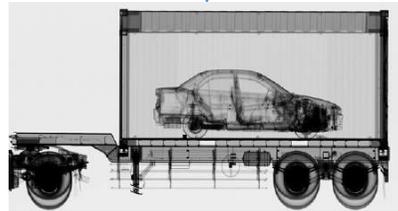
### Fermilab Accelerator Complex



# A COSA SERVONO GLI ACCELERATORI DI PARTICELLE?



Produzione di radioisotopi



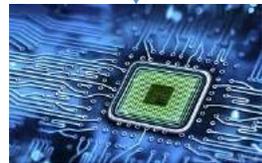
sicurezza



sterilizzazione



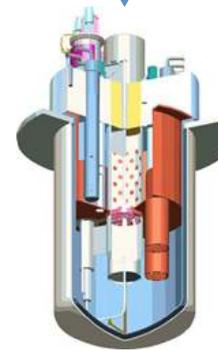
Radioterapia e Adroterapia



Impiantazione ionica



Trattamento materiali



Reattori a fissione controllati



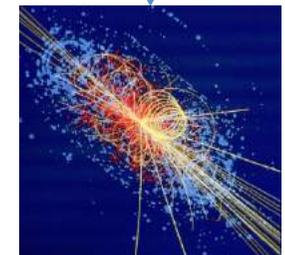
Studi di materiali per fusione nucleare



Produzione di raggi X e  $\gamma$  per fisica della materia



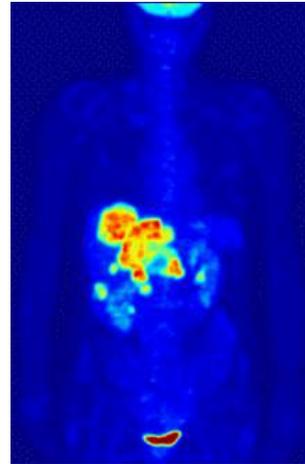
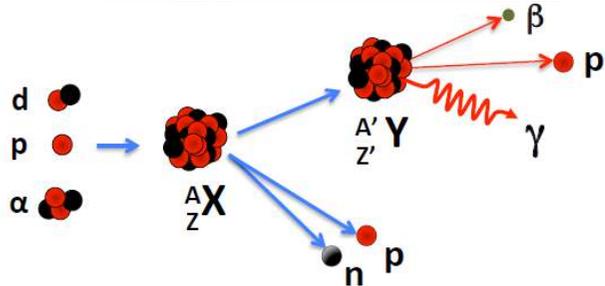
Sorgenti di neutroni



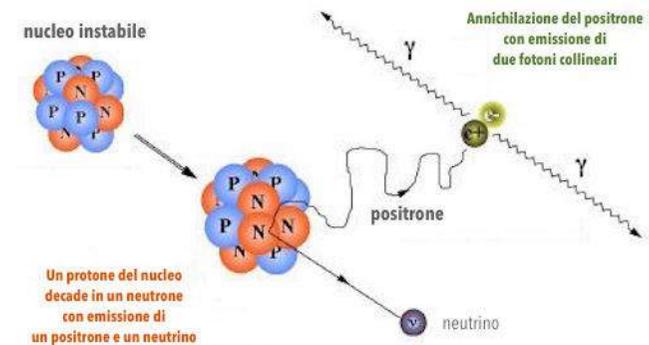
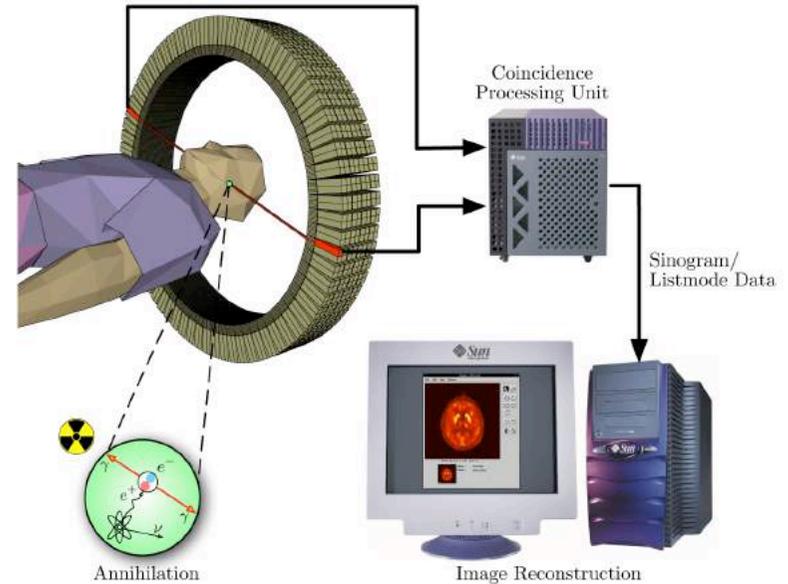
Fisica delle alte energie

# 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)

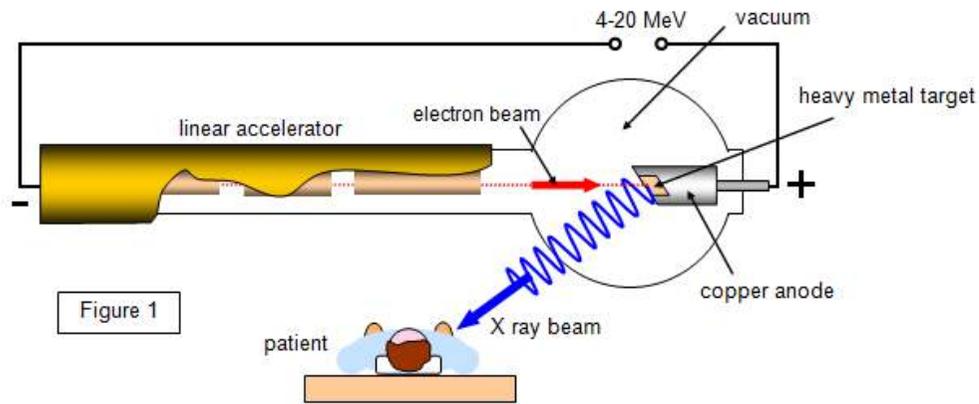


**PET: diagnostica medica (oncologica)**



# APPLICAZIONI MEDICHE: RADIOTERAPIA

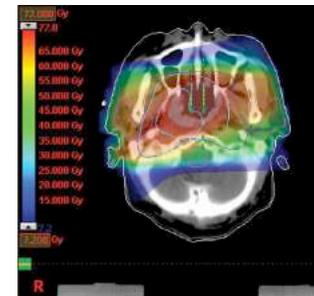
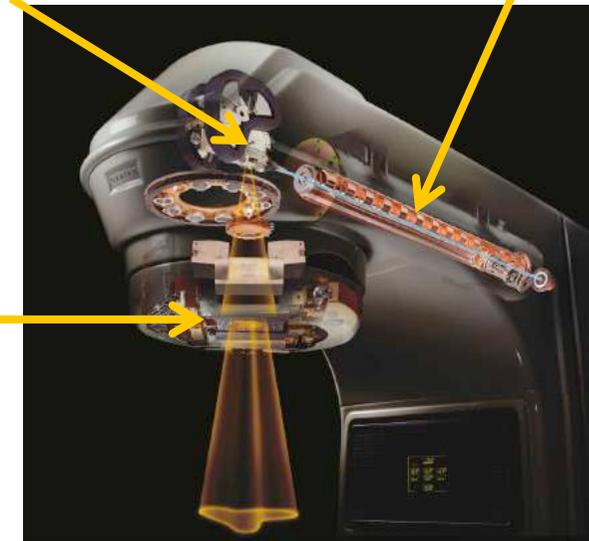
Si irradiano le masse tumorali con fasci di **raggi X** o **elettroni**



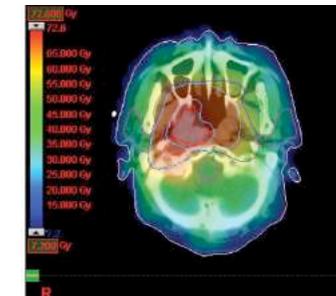
Foglio metallico per la produzione di raggi x

LINAC

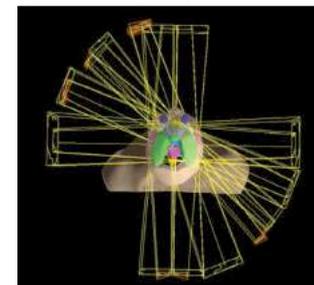
Sistema di collimazione



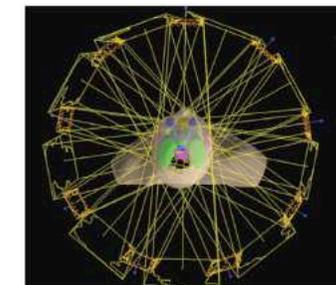
(a)



(b)



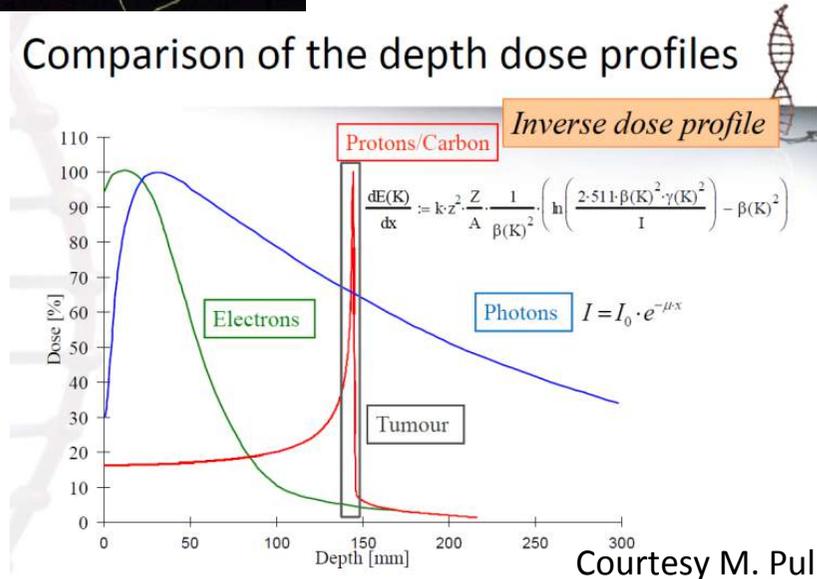
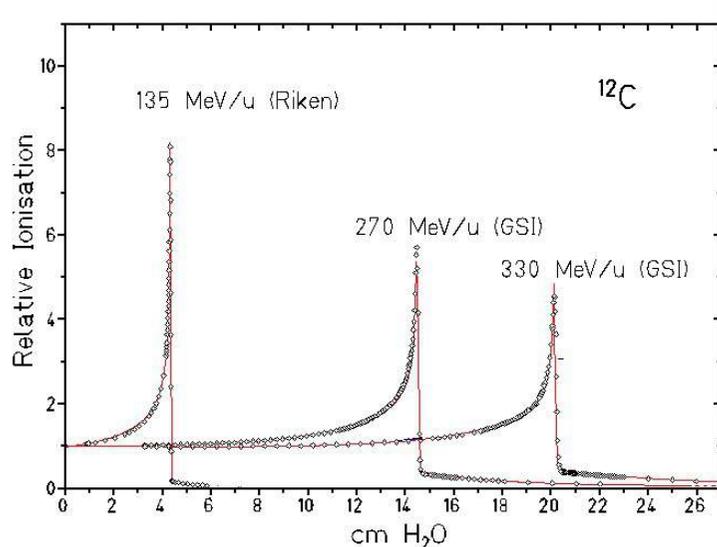
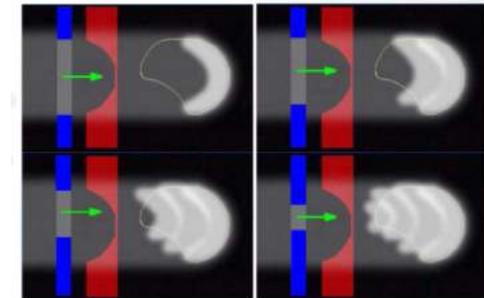
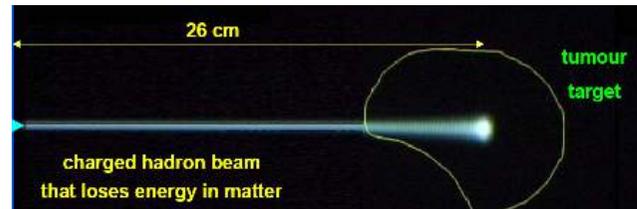
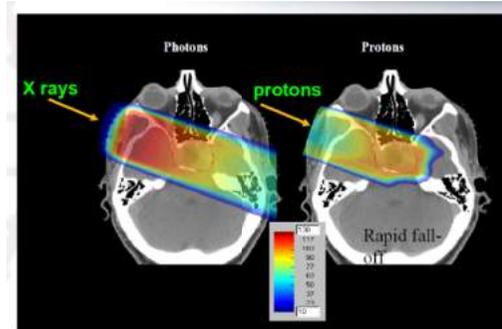
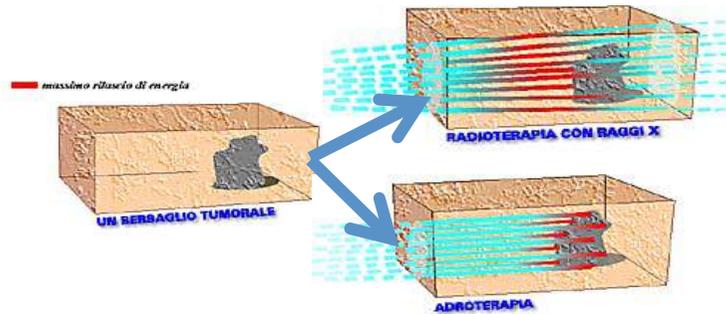
(c)



(d)

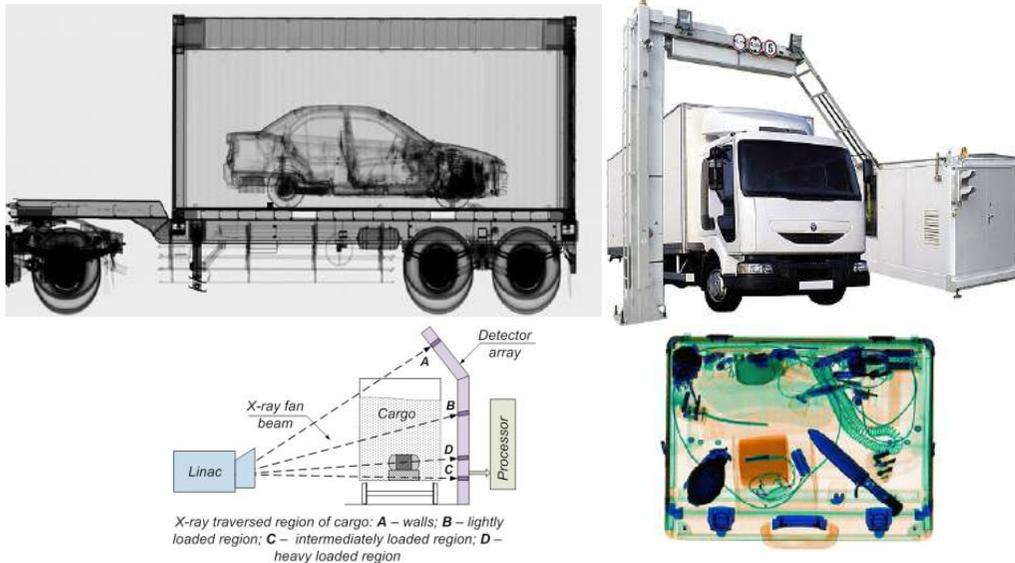
# APPLICAZIONI MEDICHE: ADROTERAPIA

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,...



# APPLICAZIONI INDUSTRIALI

## Cargo Scan con raggi X



## Trattamento di materiali polimerici: cross-linking

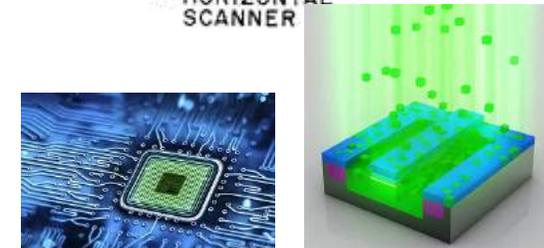
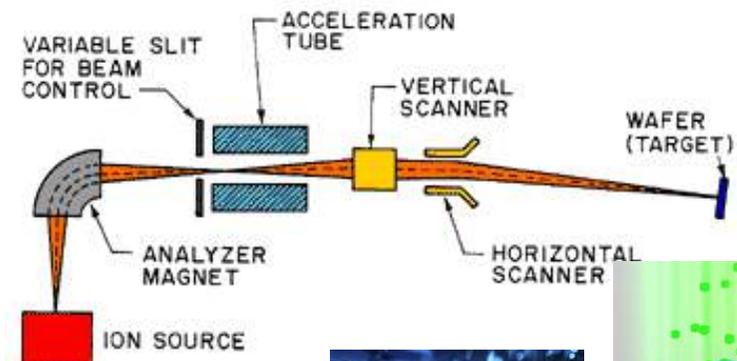
Tali trattamenti industriali aumentano le performances dei materiali in termini di resistenza al calore, elasticità, etc...



## Sterilizzazione e irradiazione di cibi per conservazione (“pastorizzazione fredda”)



## Impiantazione ionica (semiconduttori)

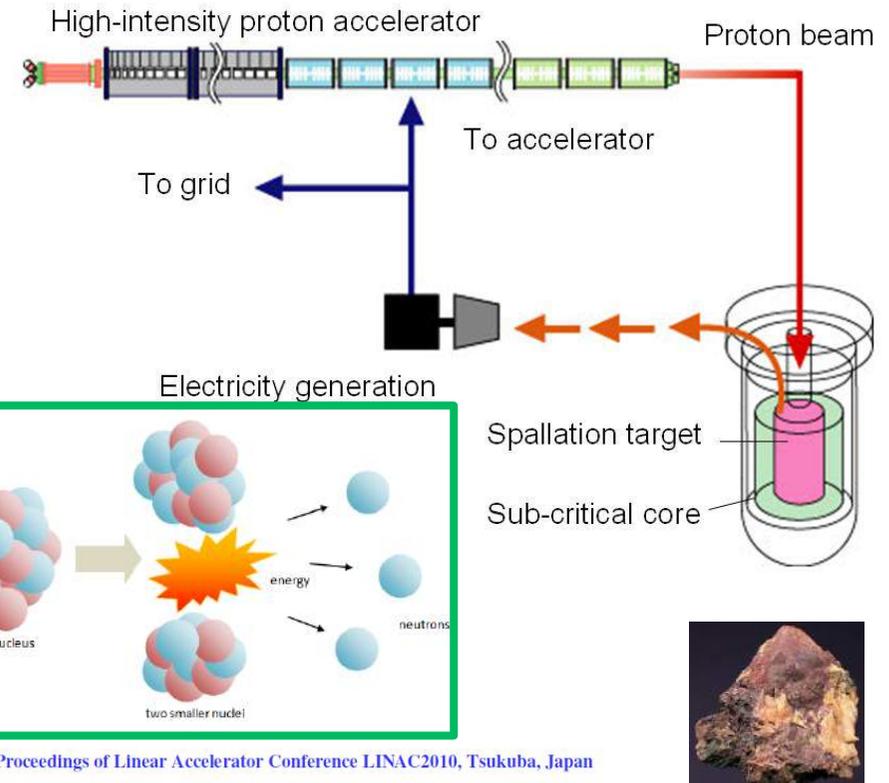


# PRODUZIONE DI ENERGIA CON ACCELERATORI

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)**



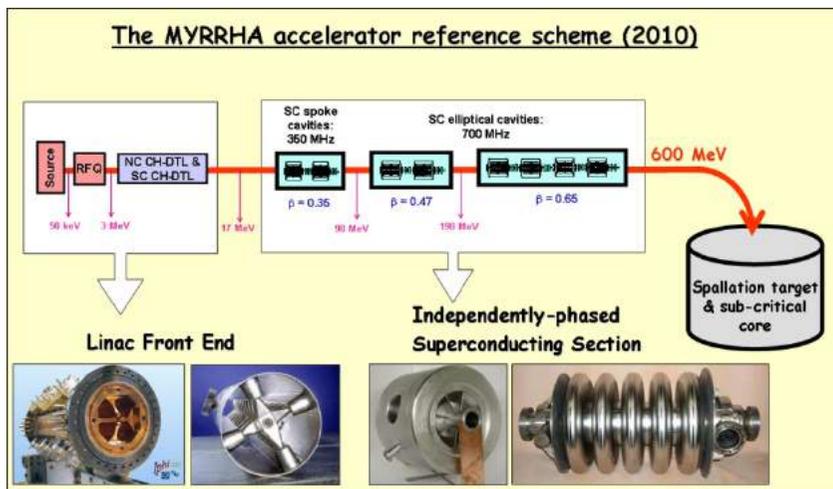
Proceedings of Linear Accelerator Conference LINAC2010, Tsukuba, Japan

## 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

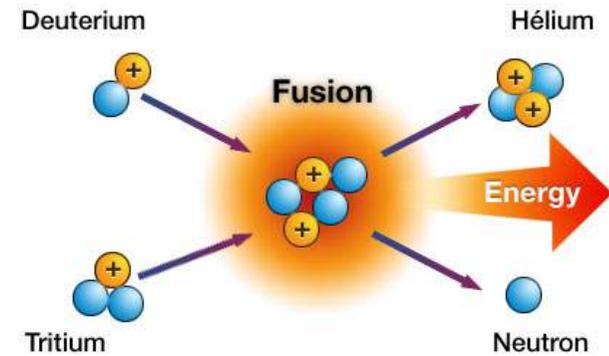
Alcuni esperimenti di laboratorio e molti studi teorici hanno dimostrato la possibilità teorica di tale impianto. **Carlo Rubbia**, è stato uno dei primi a concepire un progetto di un reattore subcritico, il cosiddetto "**amplificatore di energia**".

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

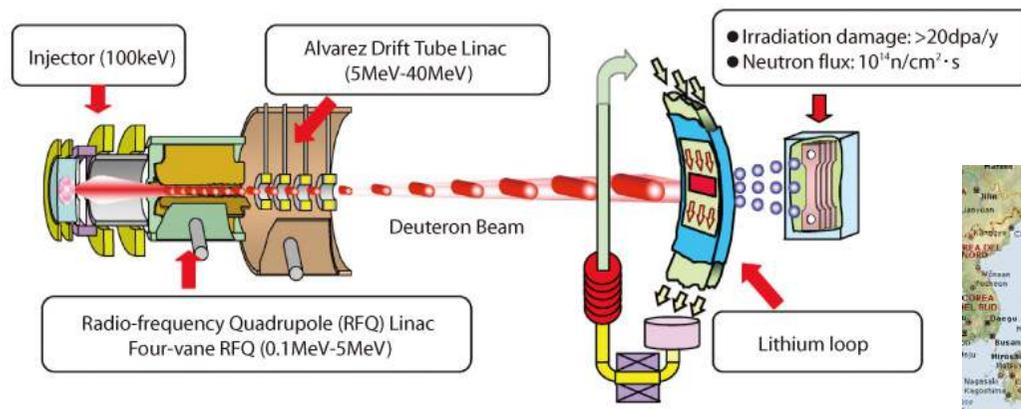
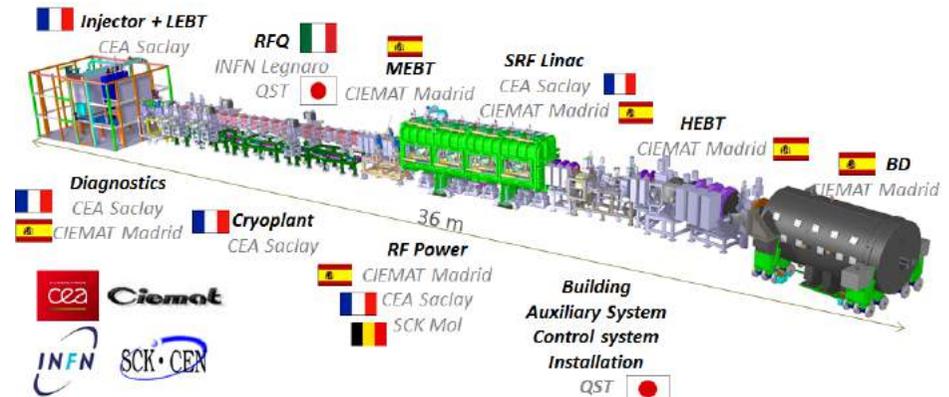


# TEST DI MATERIALI PER REATTORI A FUSIONE NUCLEARE

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

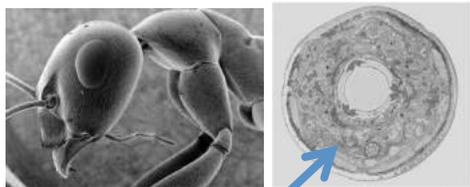


L'International Fusion Materials Irradiation Facility (IFMIF), è un **impianto di test di materiali** utilizzabili in un reattore di fusione. E' una **sorgente di neutroni** basata sul un acceleratore di deuterio che collidendo contro atomi di **litio** produce un flusso di neutroni analogo a quello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



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

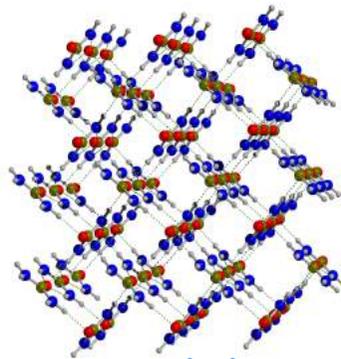
Luce visibile:  
400-700 nm ( $\sim 10^{-7}$  m)



1-10  $\mu$ m

Risoluzione 200 nm

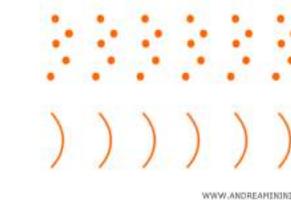
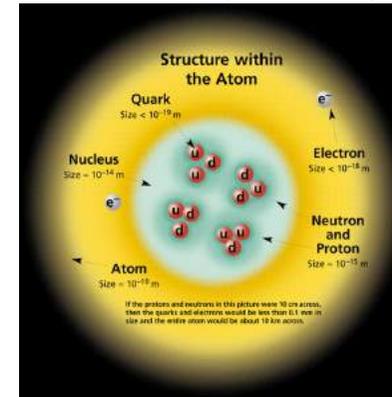
Raggi X:  
0.01-10 nm ( $\sim 10^{-11}$ - $10^{-8}$  m)



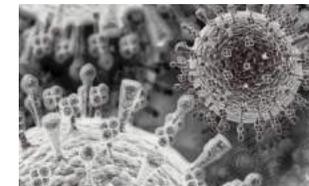
$\sim 10^{-10}$  m



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



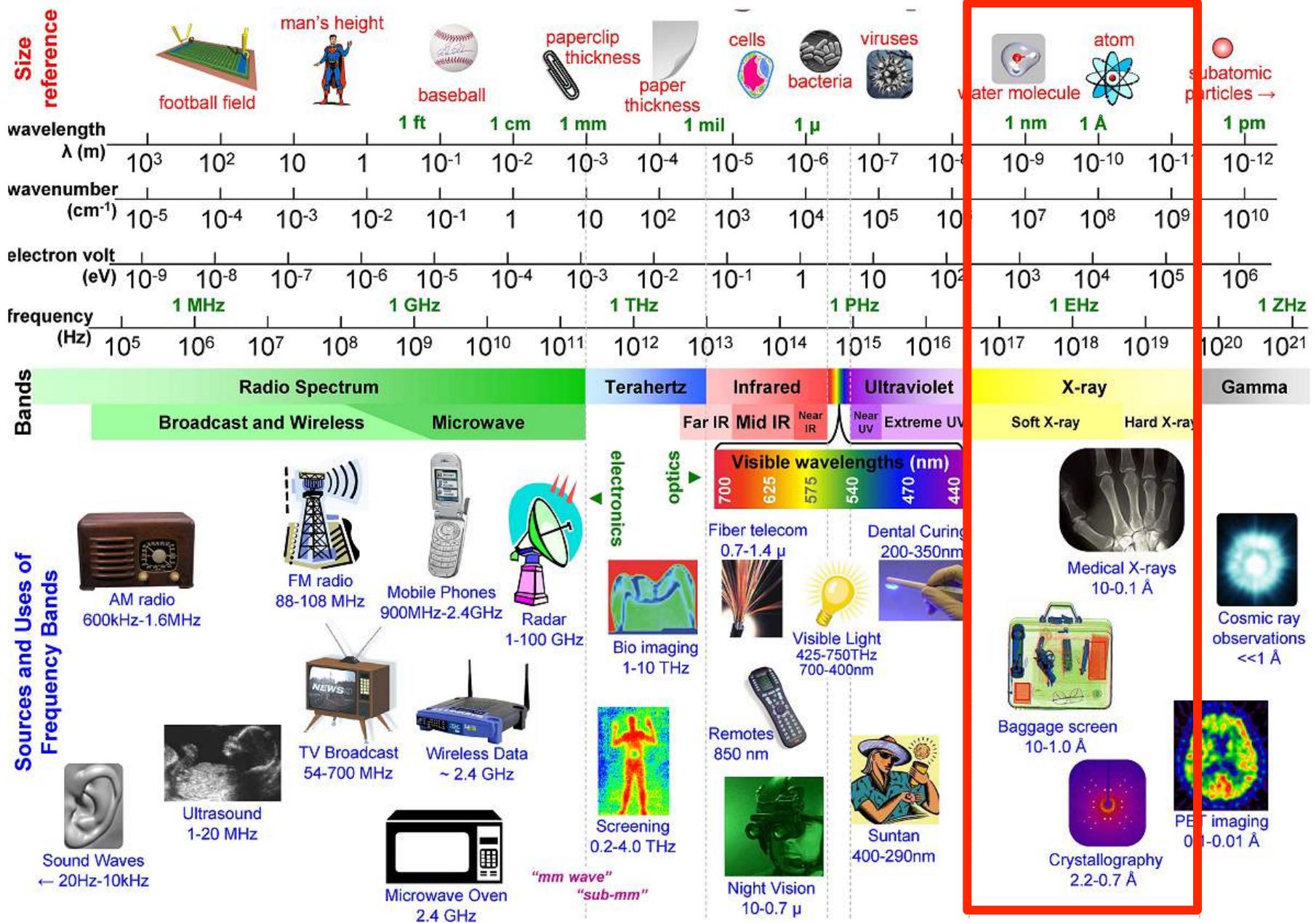
$$\lambda = h/p$$



FOTONI

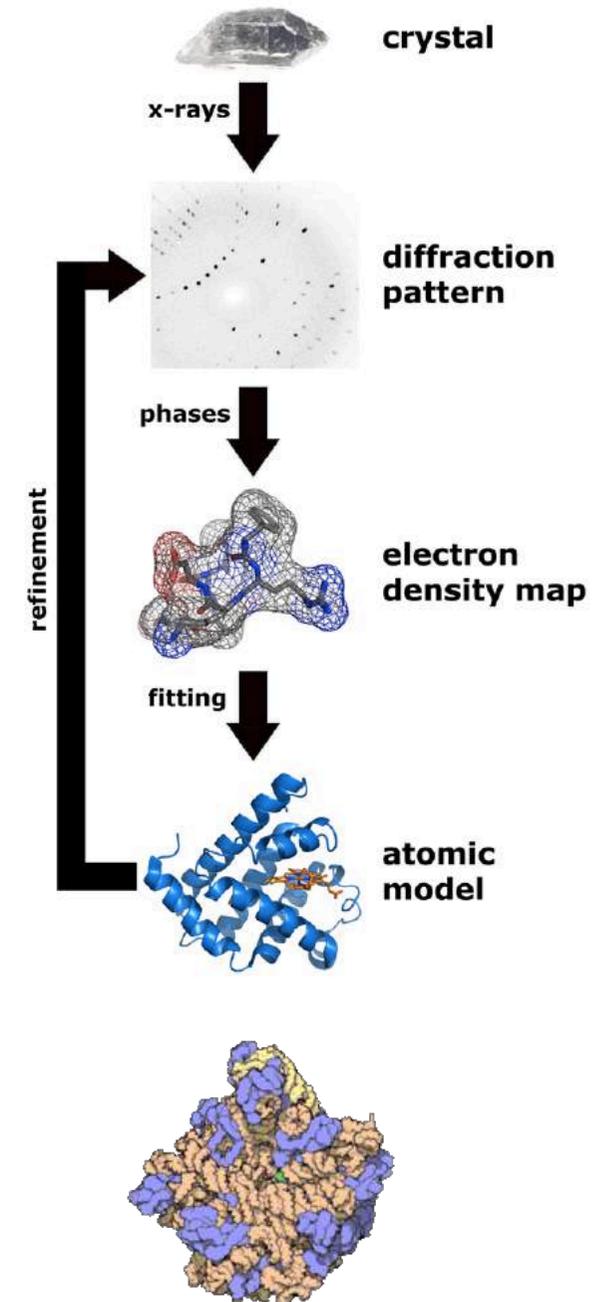
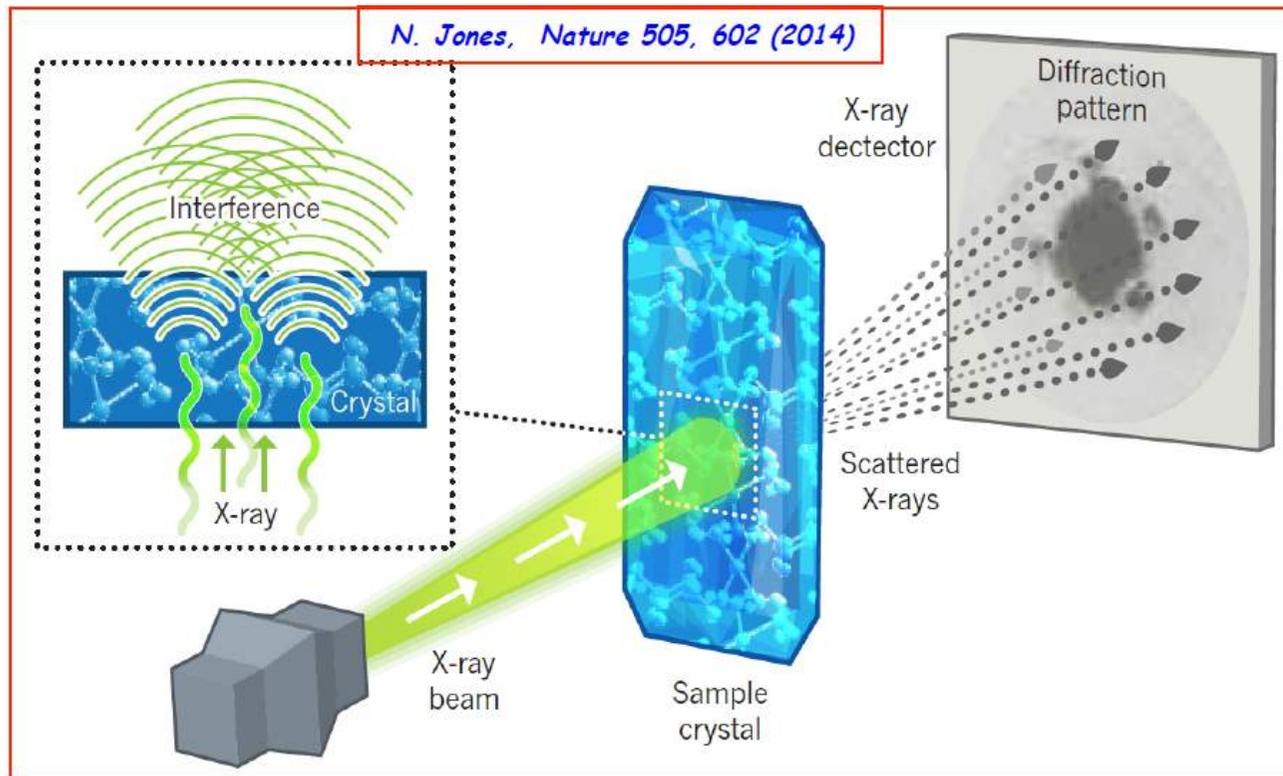
PARTICELLE IN GENERALE

# LUCE A DIVERSA LUNGHEZZA D'ONDA: RAGGI X



# WHY X-RAYS ARE SO IMPORTANT?

Using **X-rays** we can study the atomic structure of materials because **wavelengths are of the order of  $10^{-10}$  m ( $1\text{\AA}$ )**.



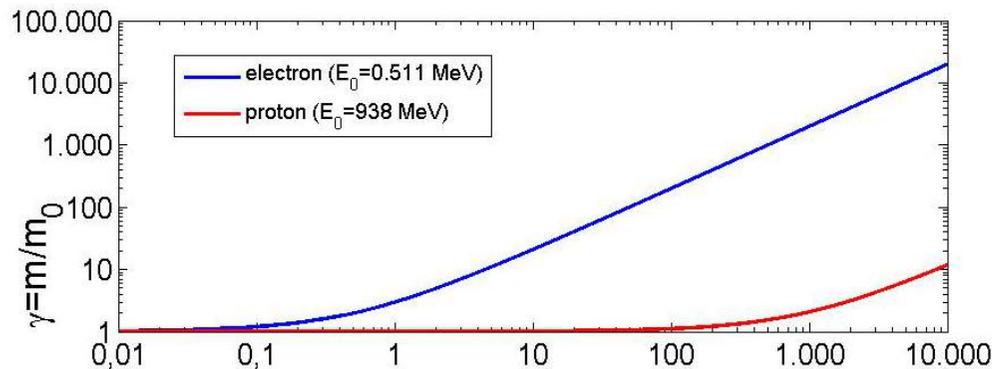
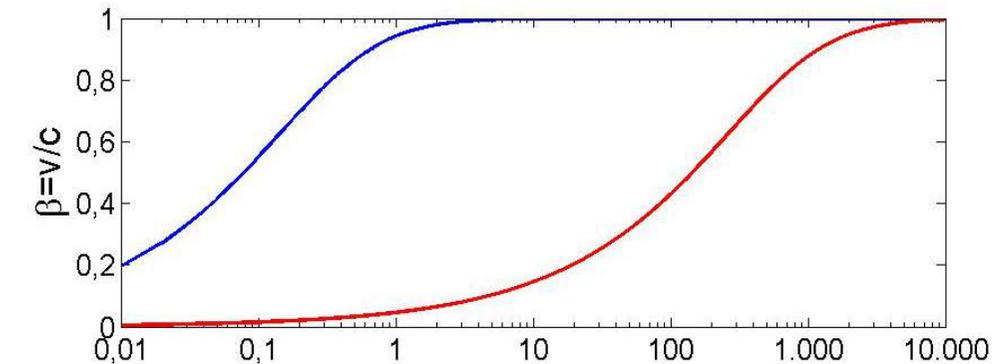
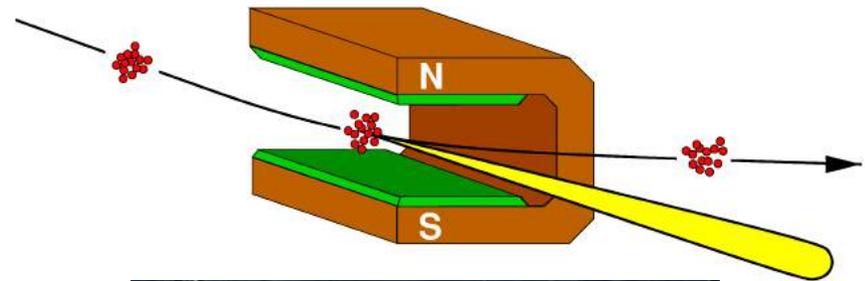
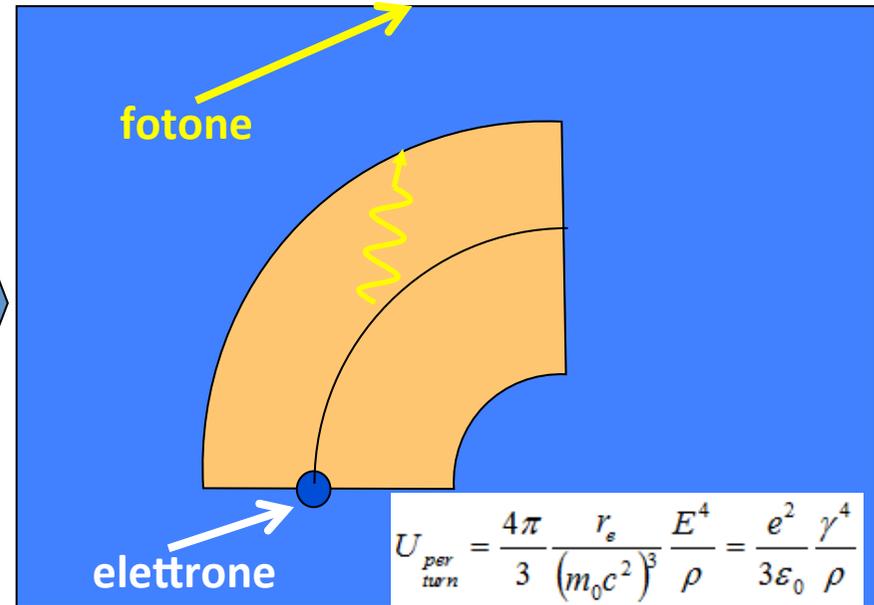
Courtesy A. Balerna

# 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).

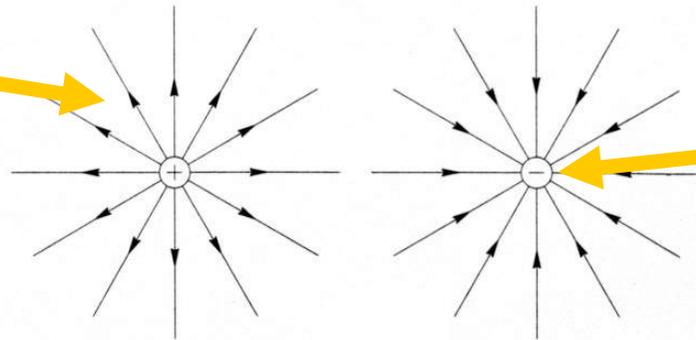
Tale fenomeno è tanto più accentuato quanto più la particella è relativistica ( $\gamma > 1$ ) ovvero si muove a **velocità prossime a quella della luce**.

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

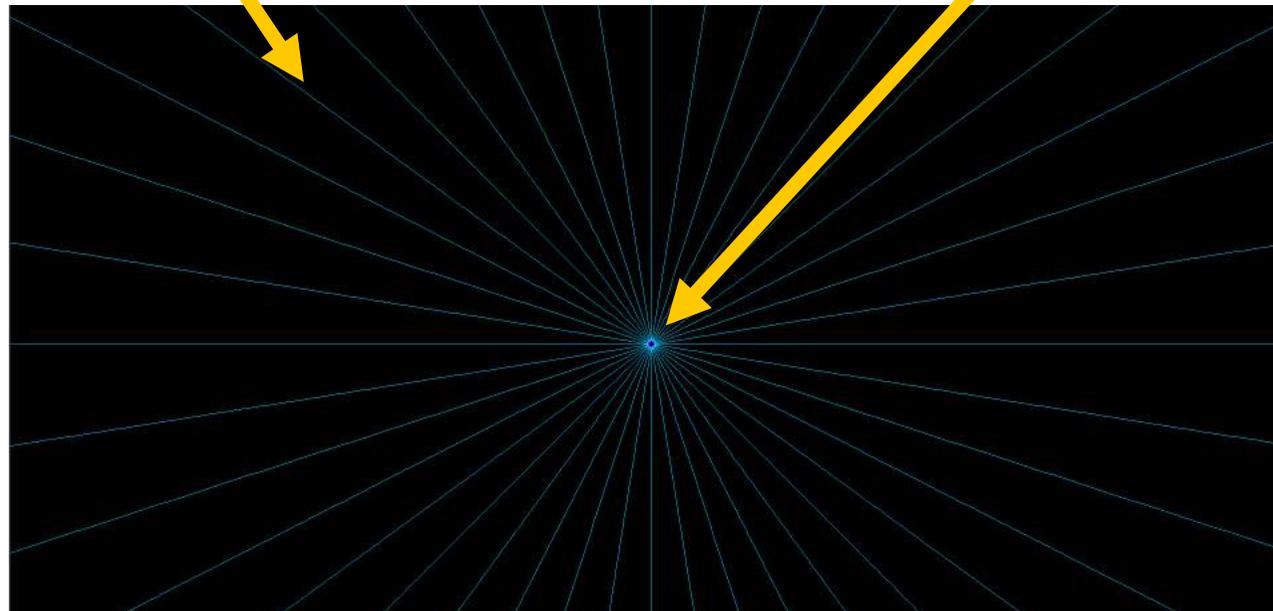


# RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE

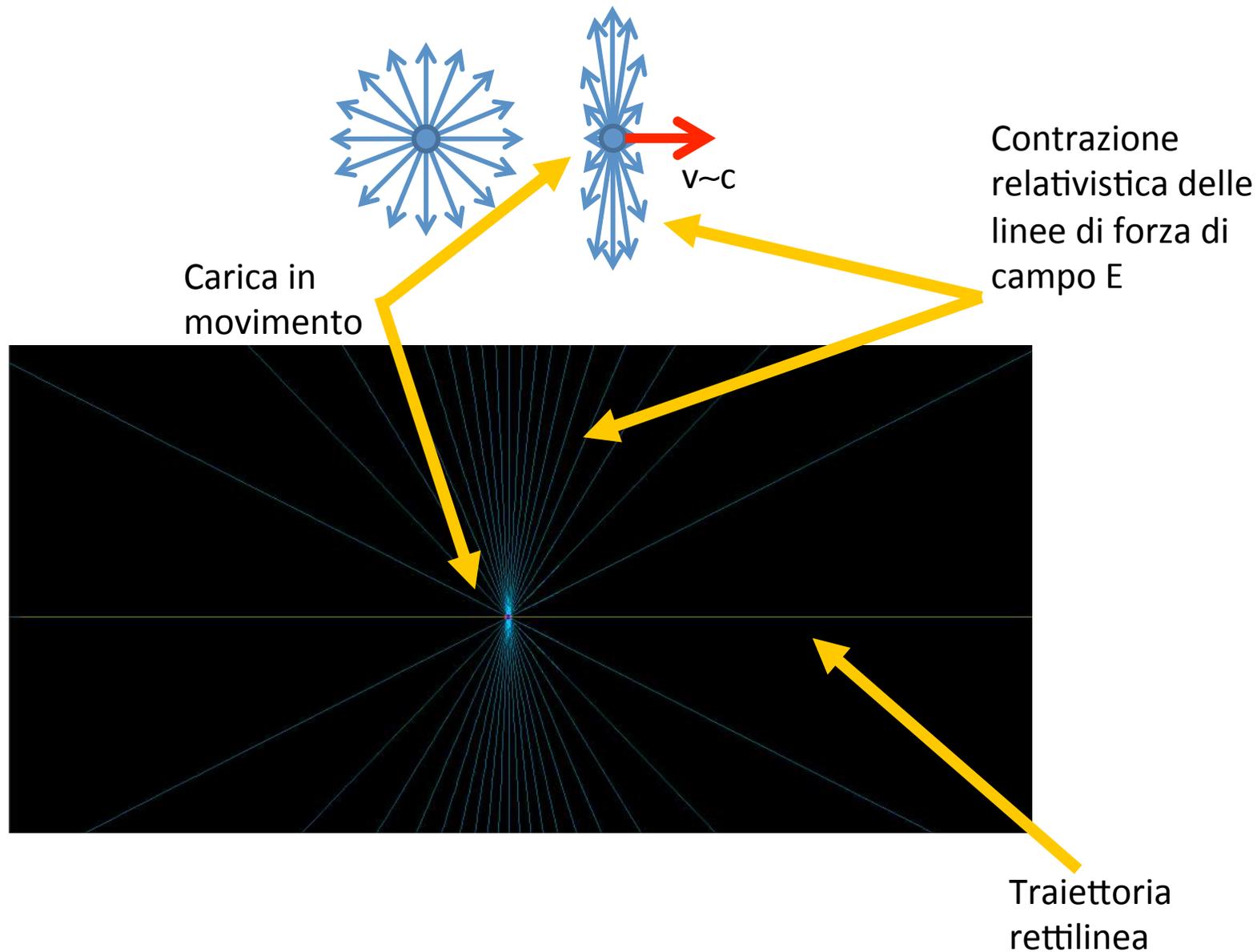
Campo elettrico



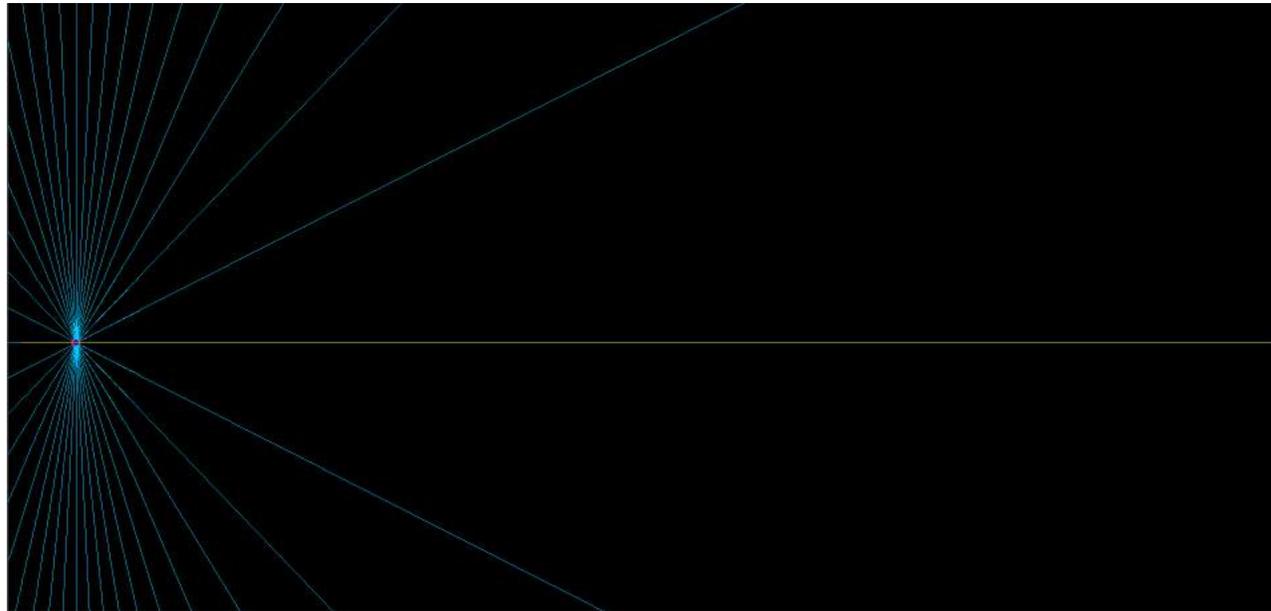
Carica ferma



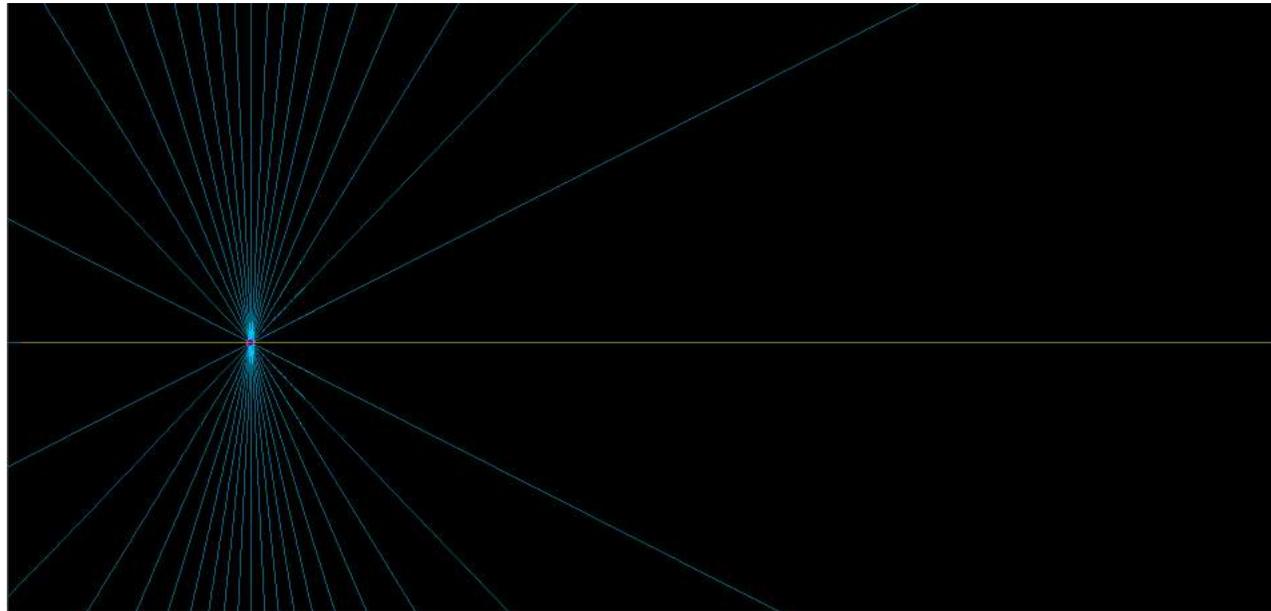
# RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE



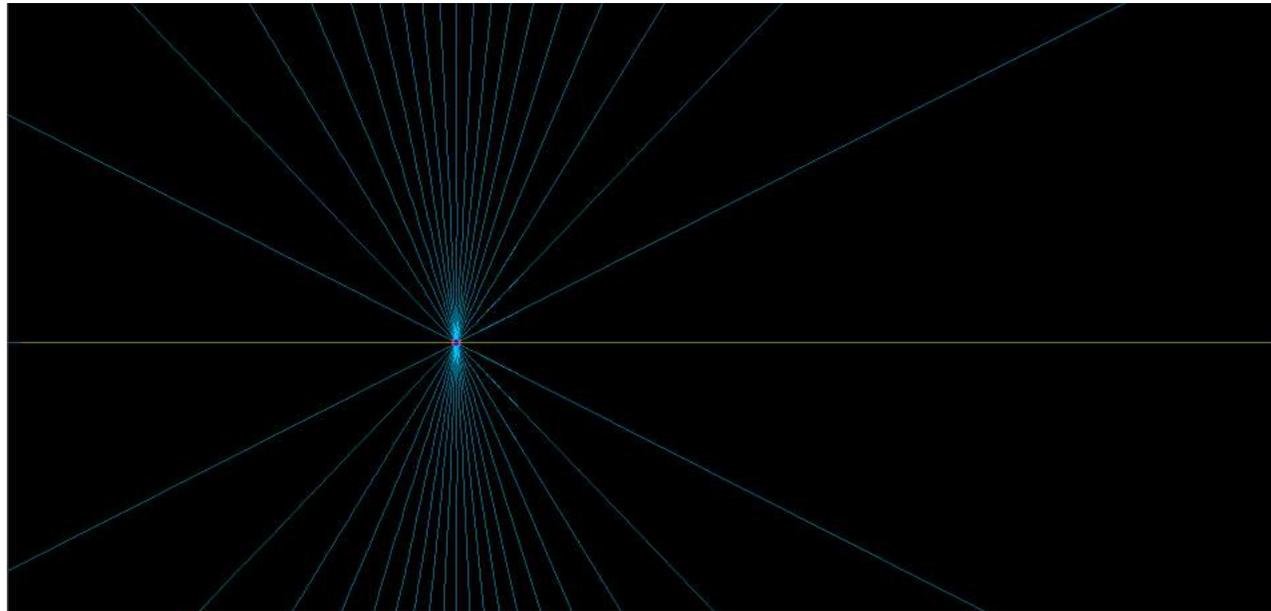
# RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE



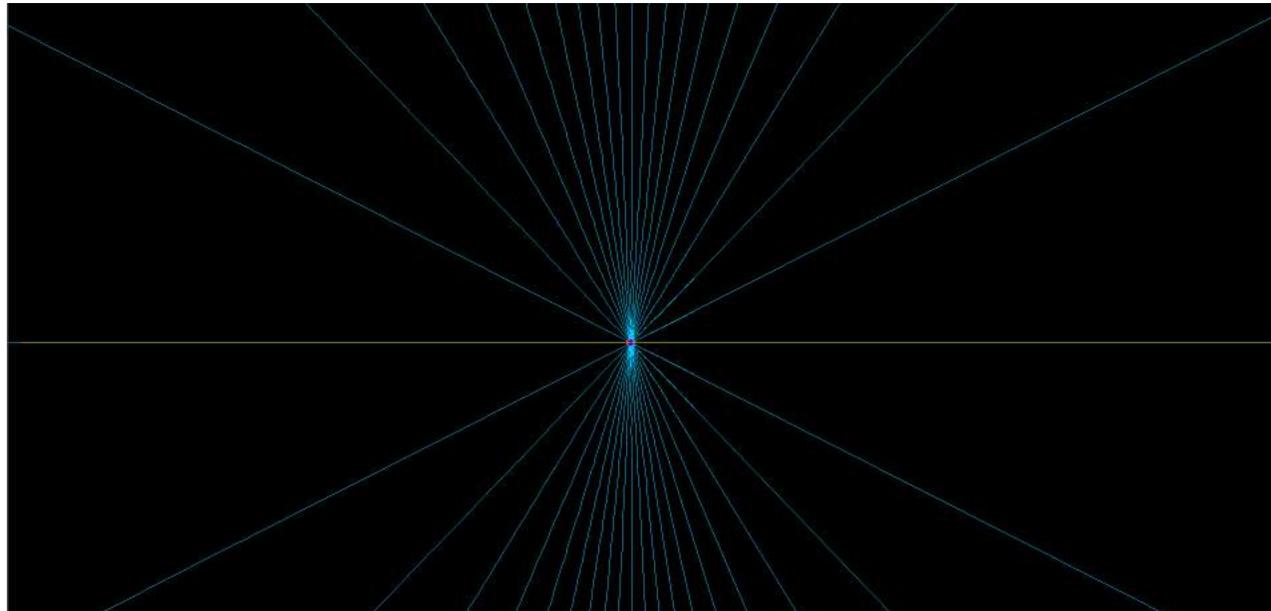
# RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE



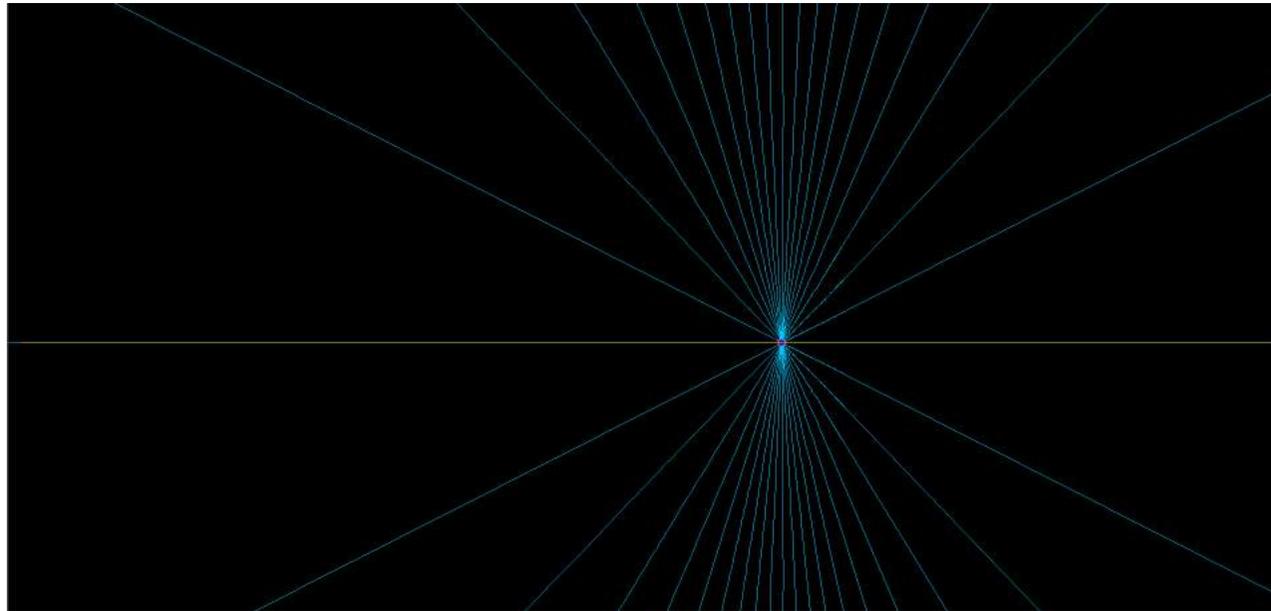
# RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE



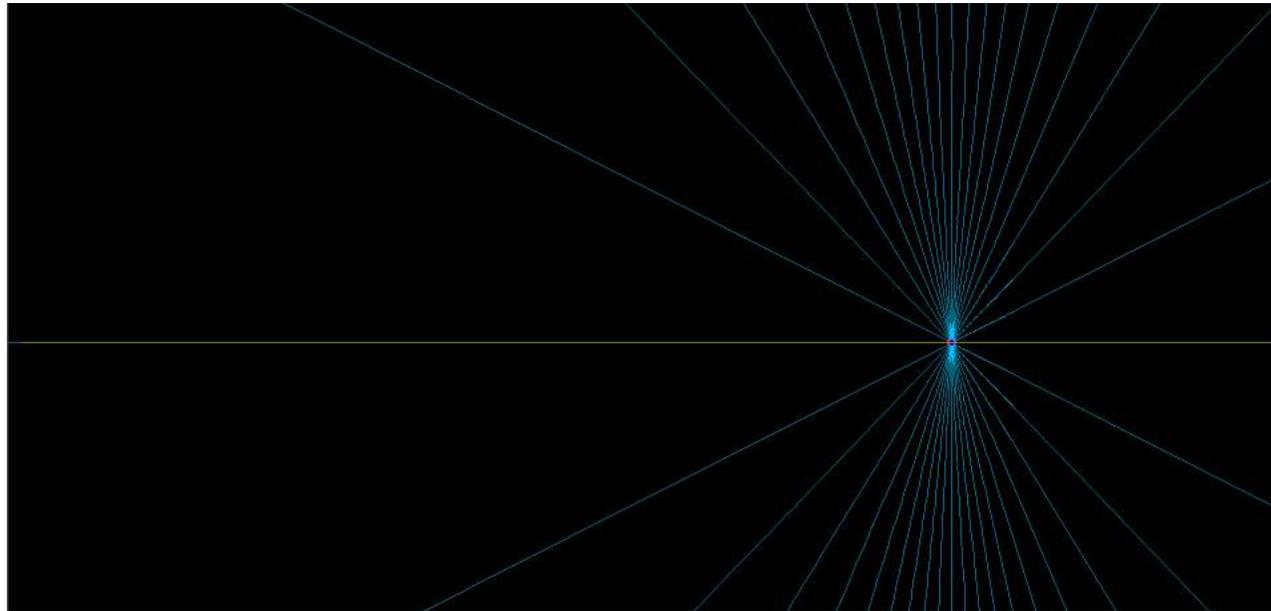
# RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE



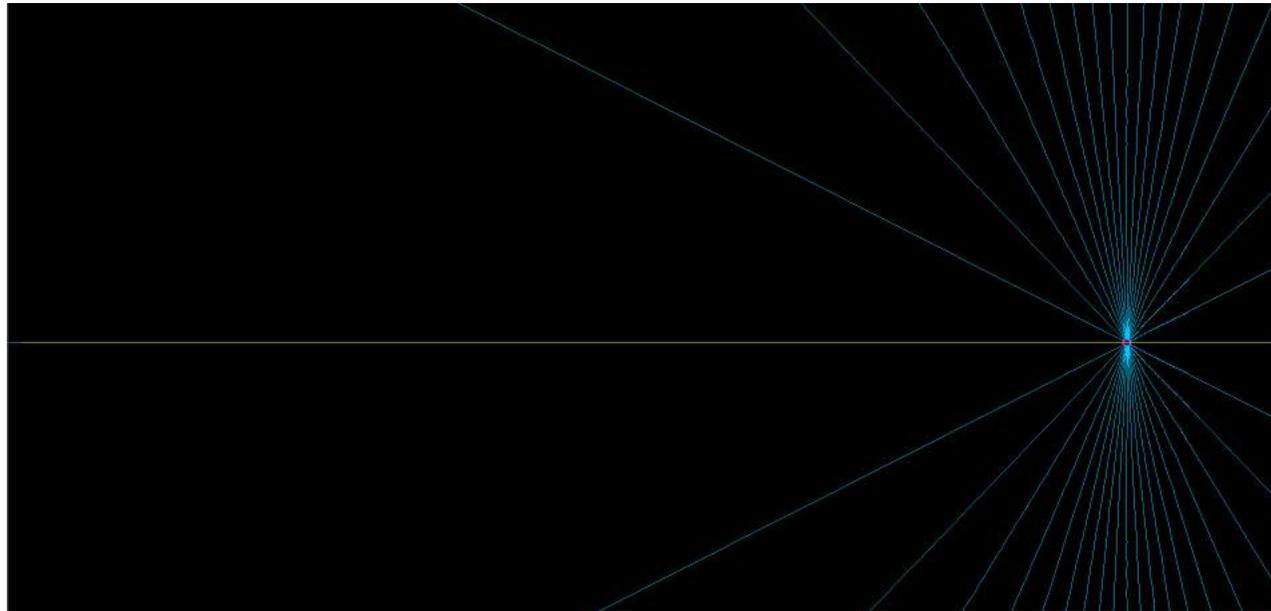
# RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE



# RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE



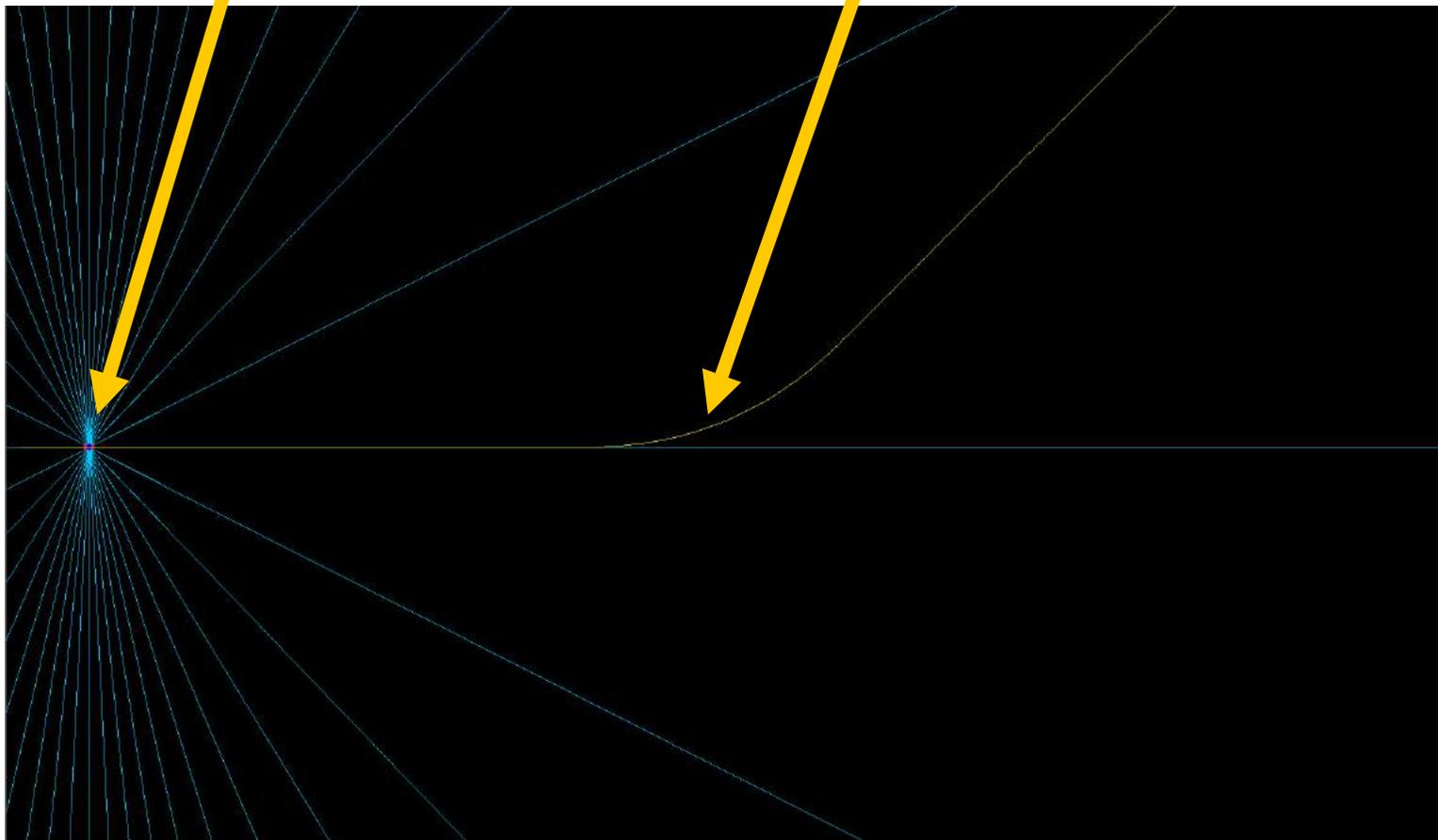
# RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE



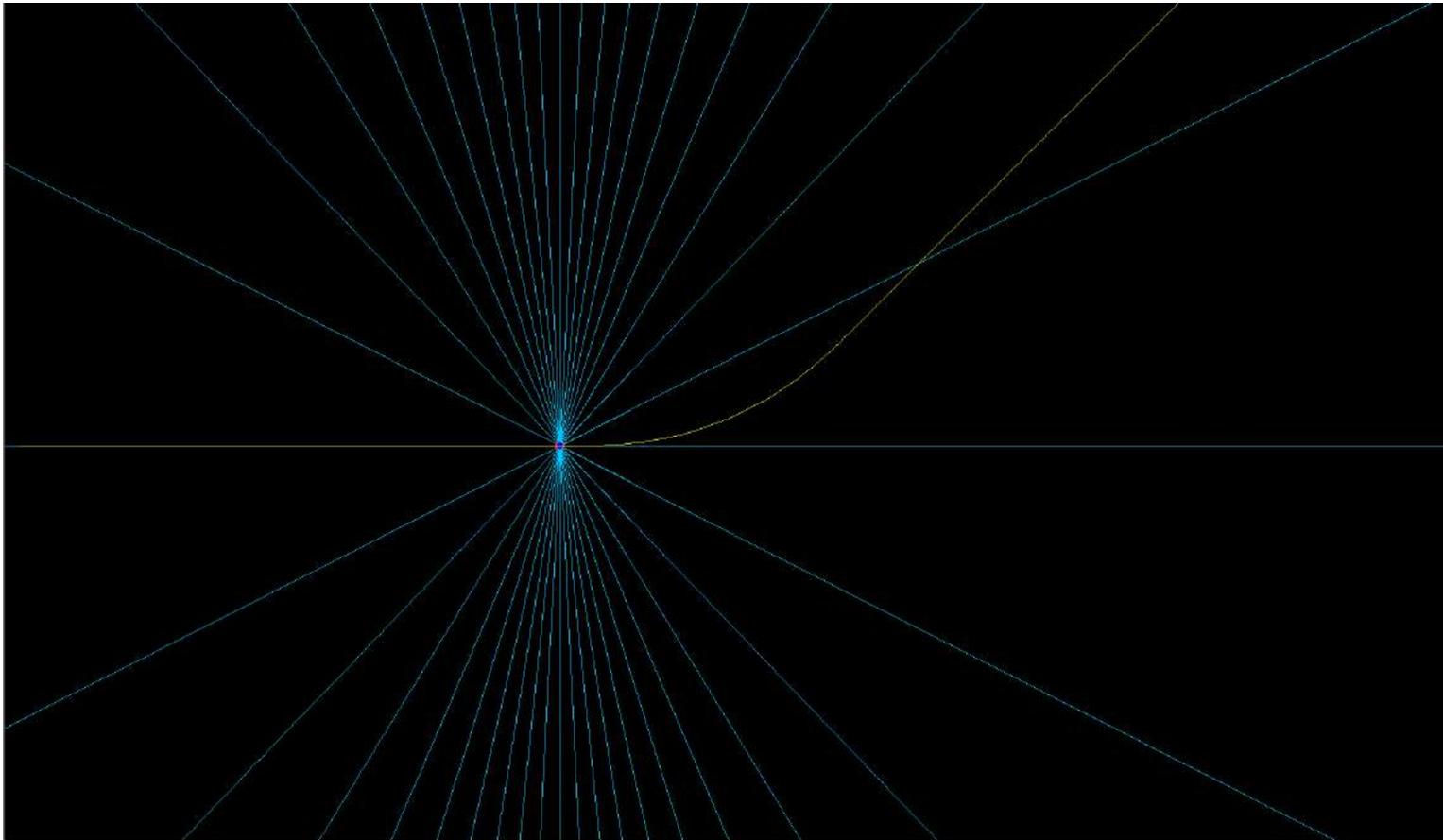
# RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: DIPOLO

Carica in movimento

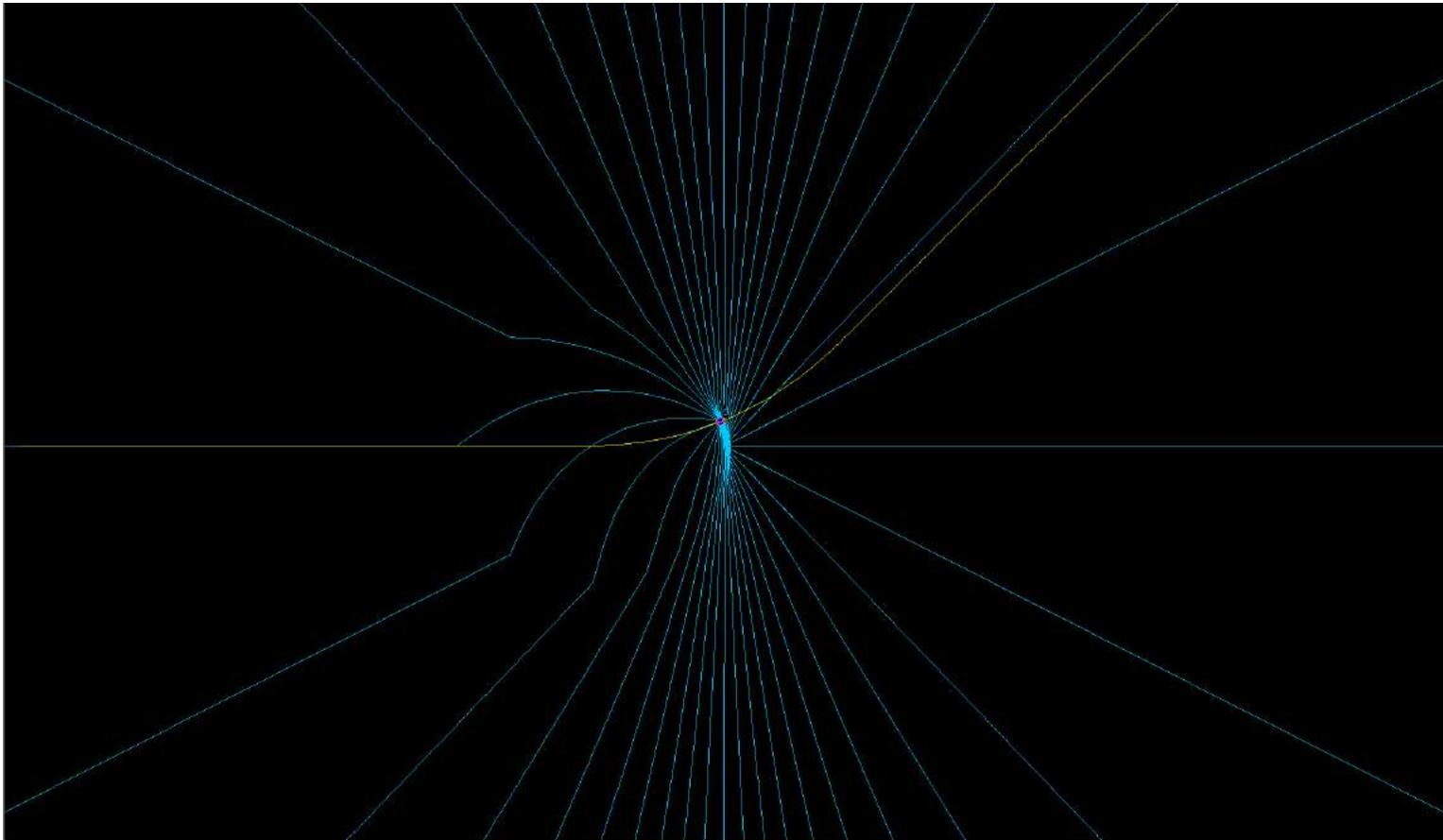
Traiettoria  
generata da un  
dipolo



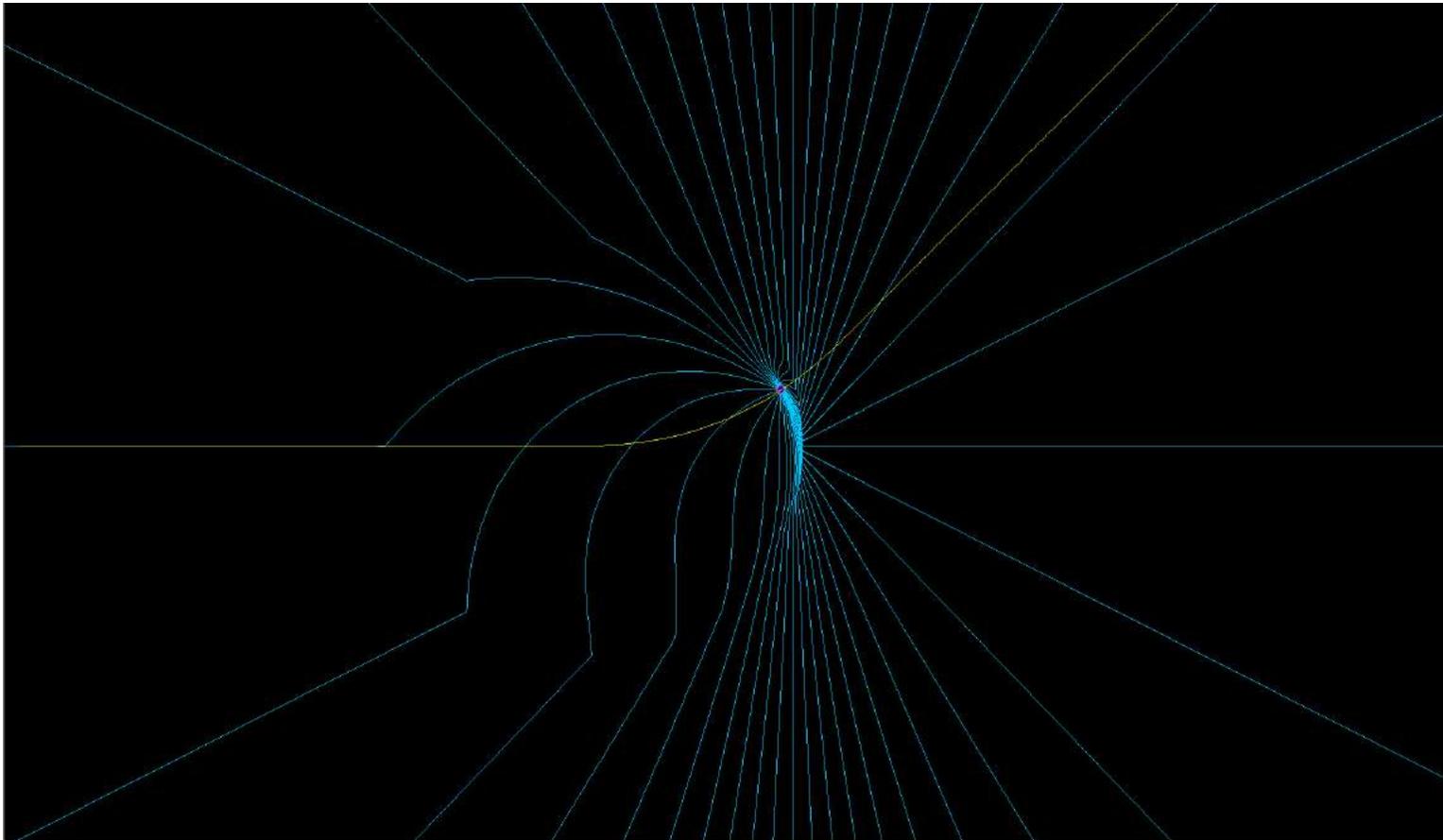
# RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: DIPOLO



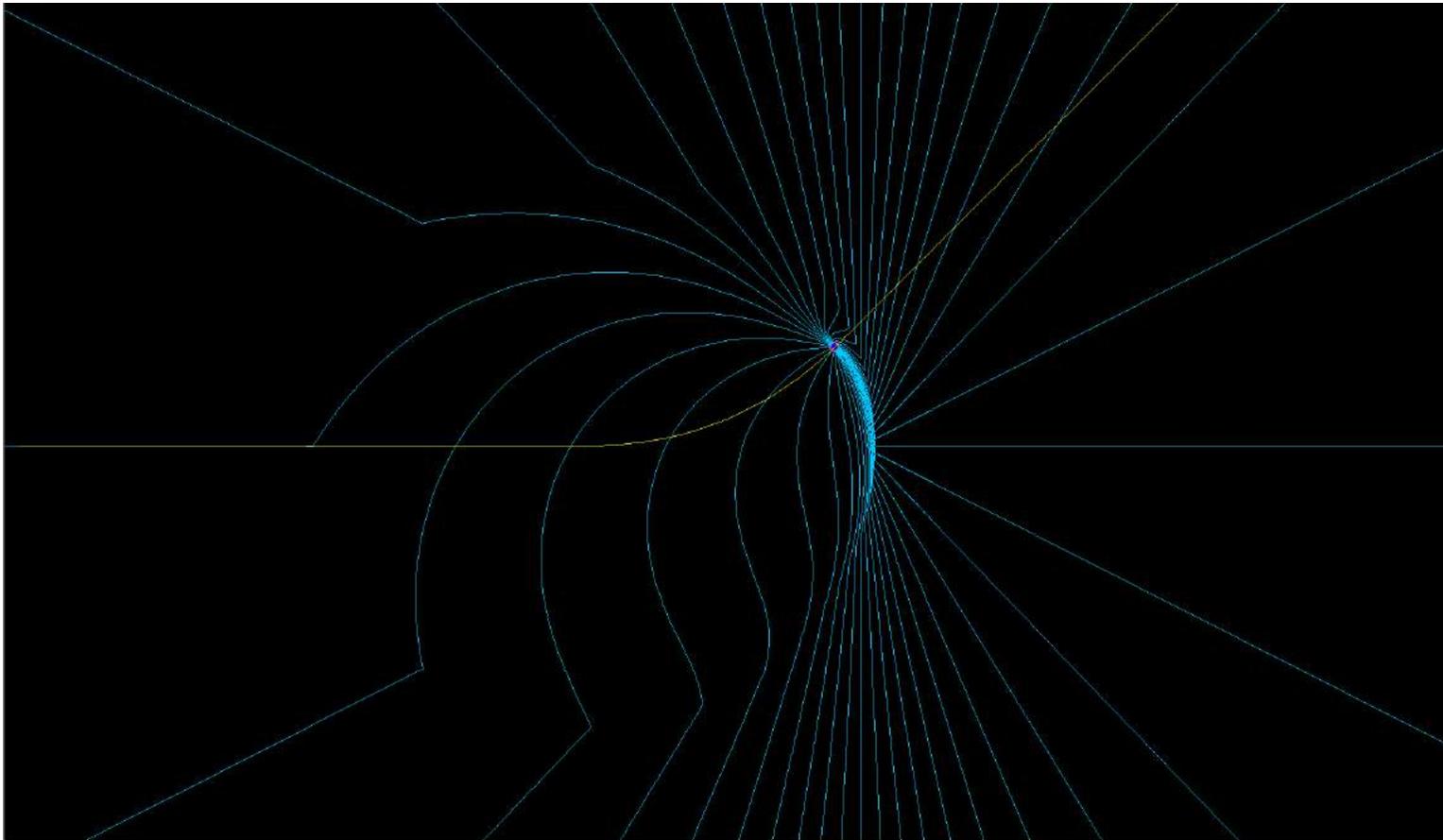
# RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: DIPOLO



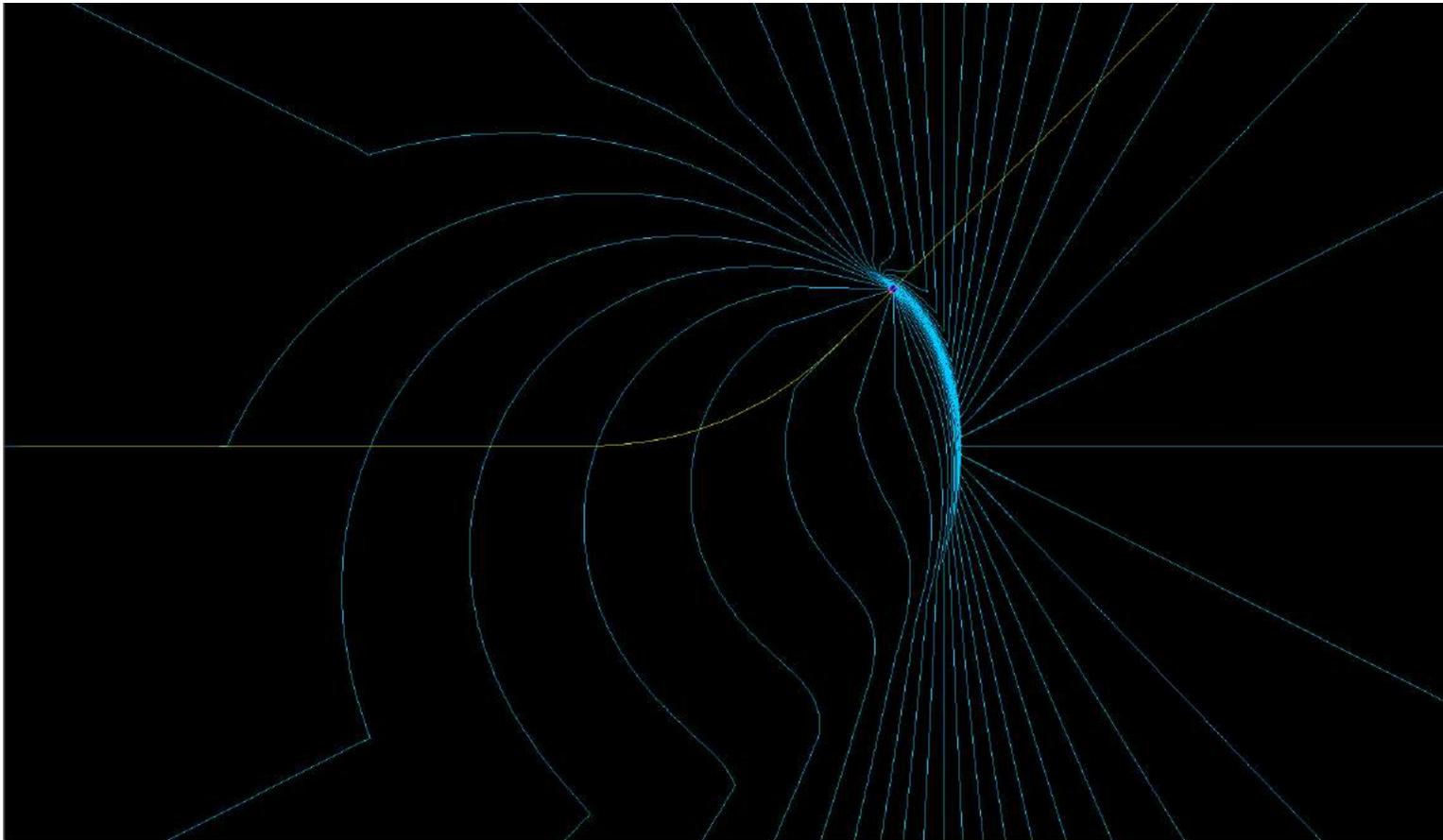
# RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: DIPOLO



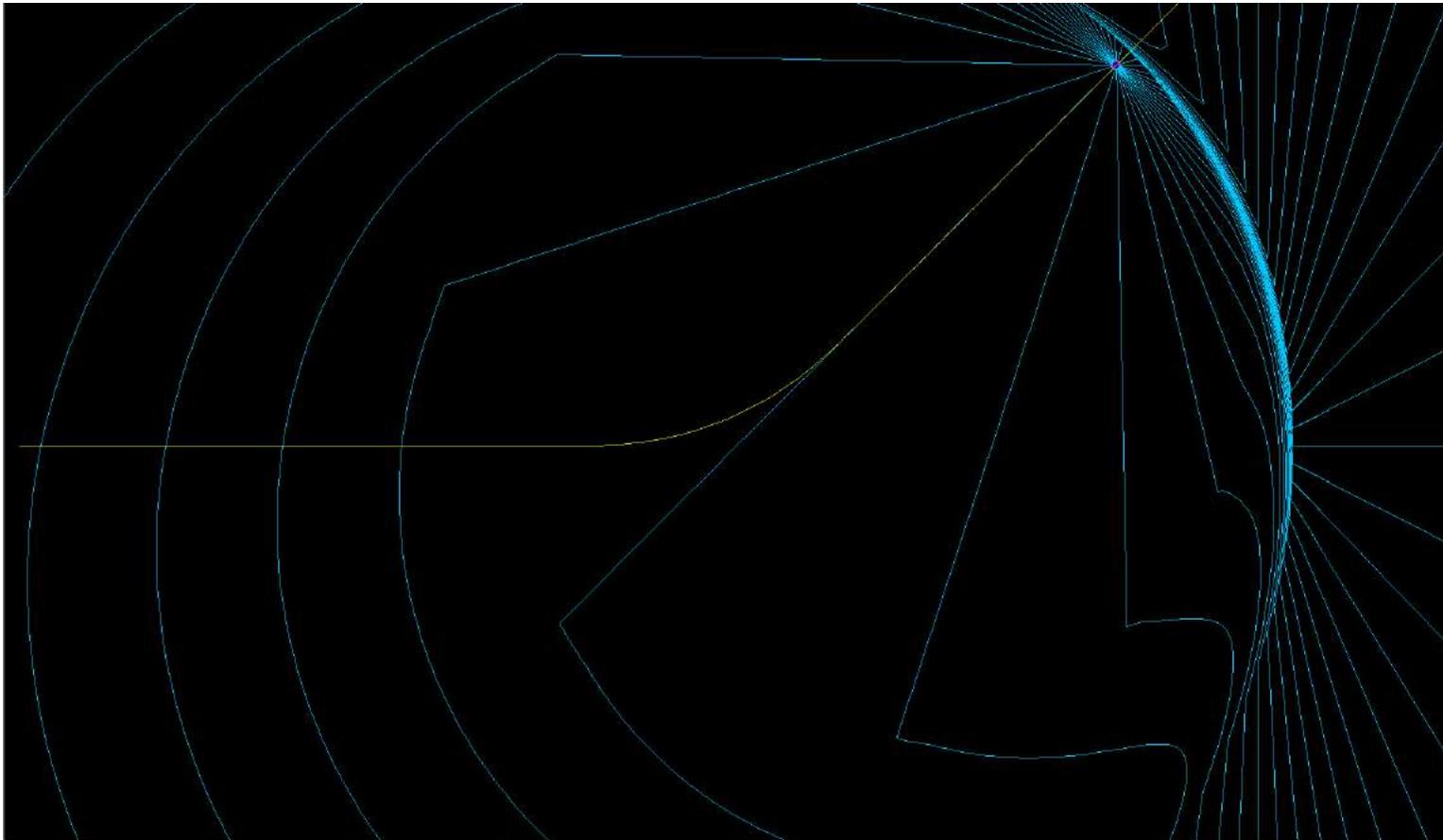
# RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: DIPOLO



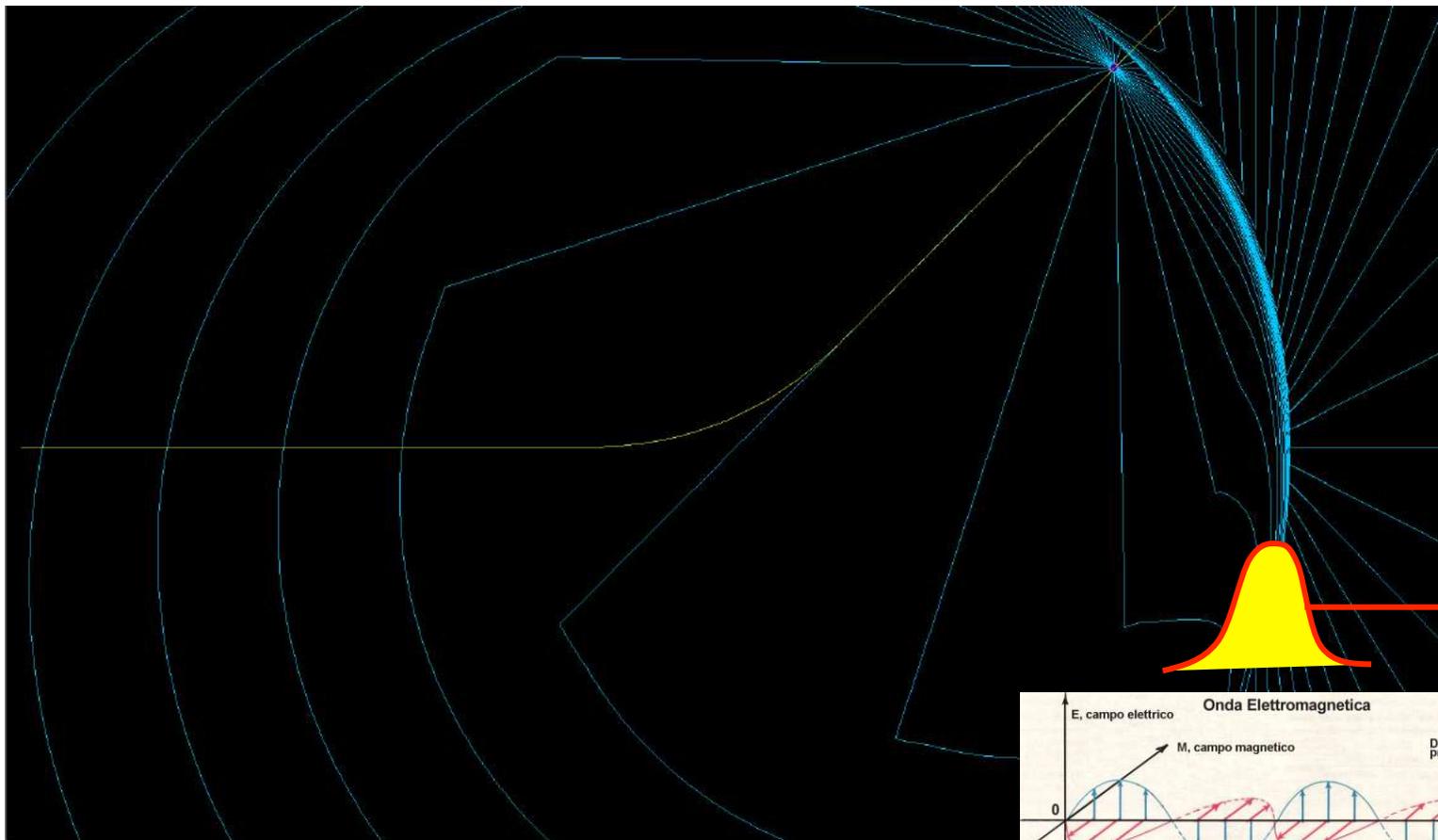
# RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: DIPOLO



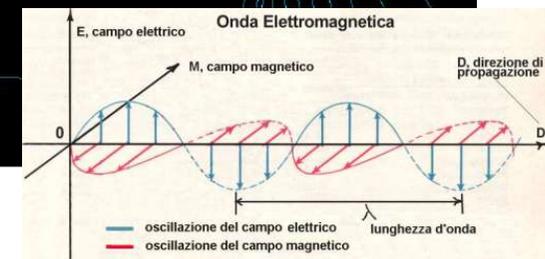
# RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: DIPOLO



# RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: DIPOLO

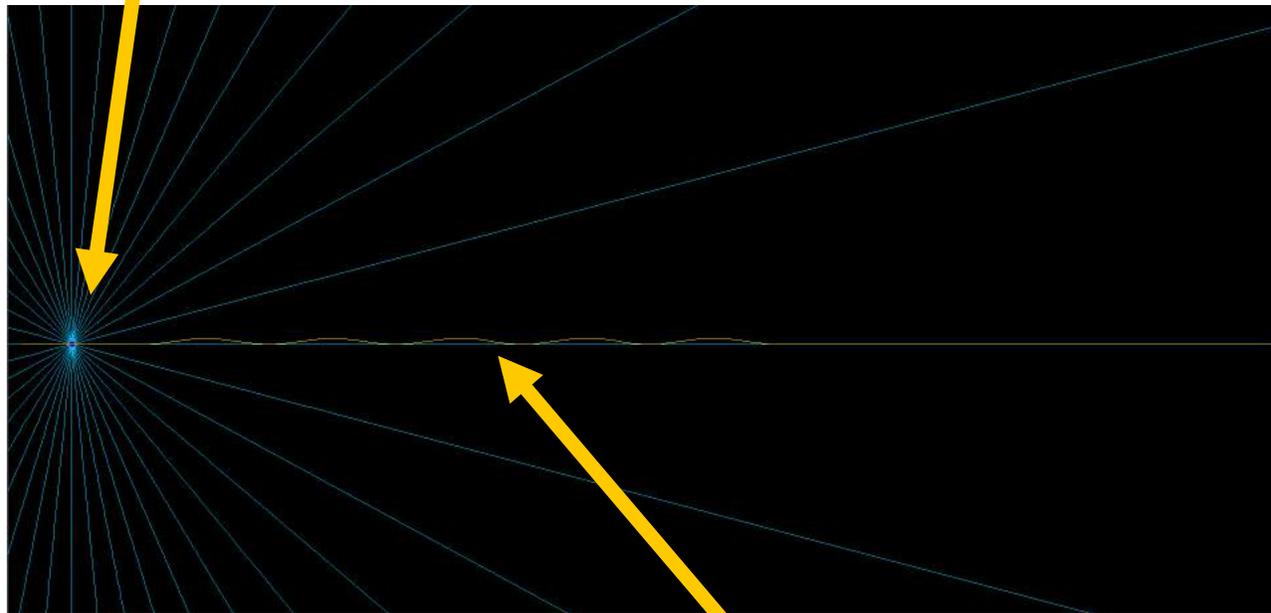
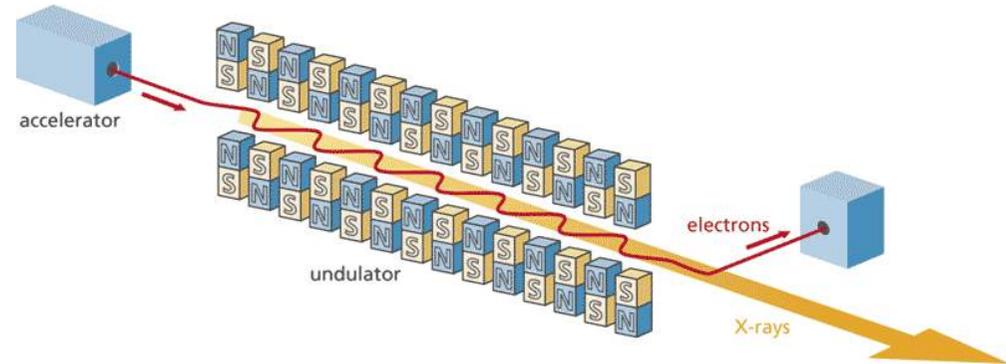


Onda piana



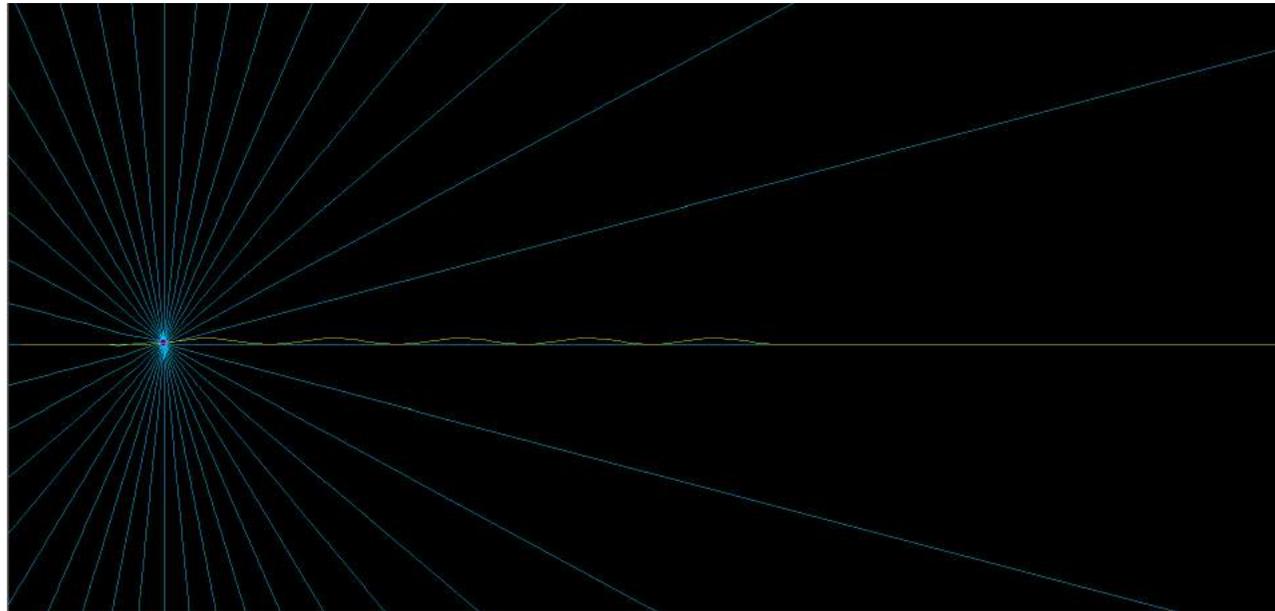
# RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: ONDULATORE

Carica in movimento

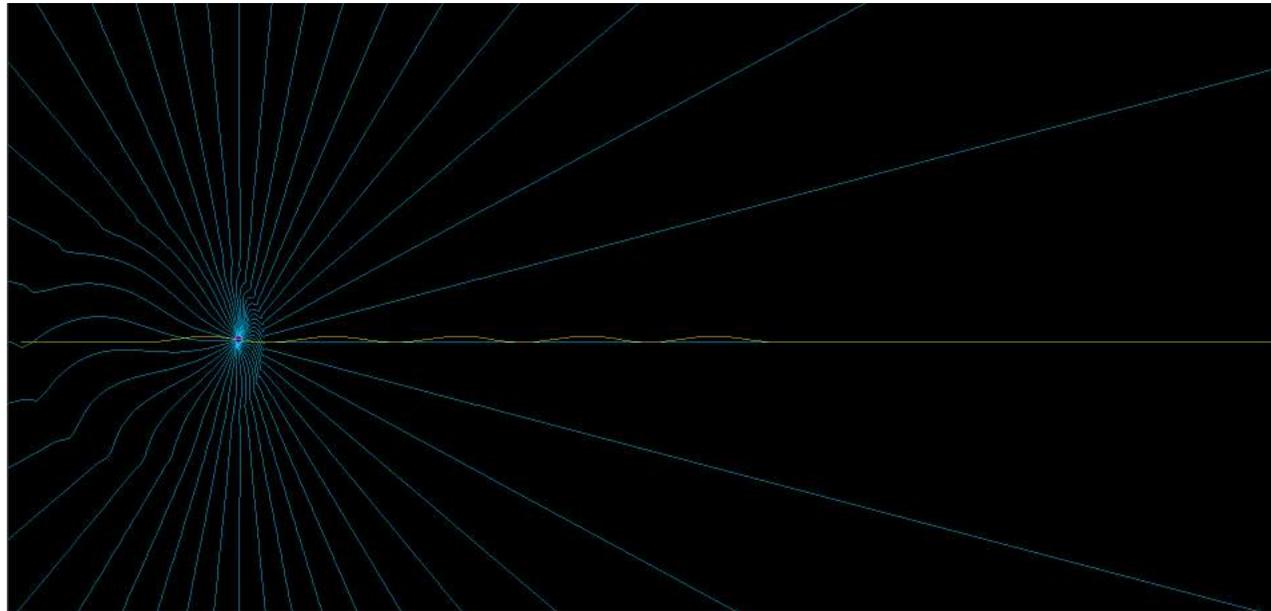


Traiettoria in un  
ondulatore

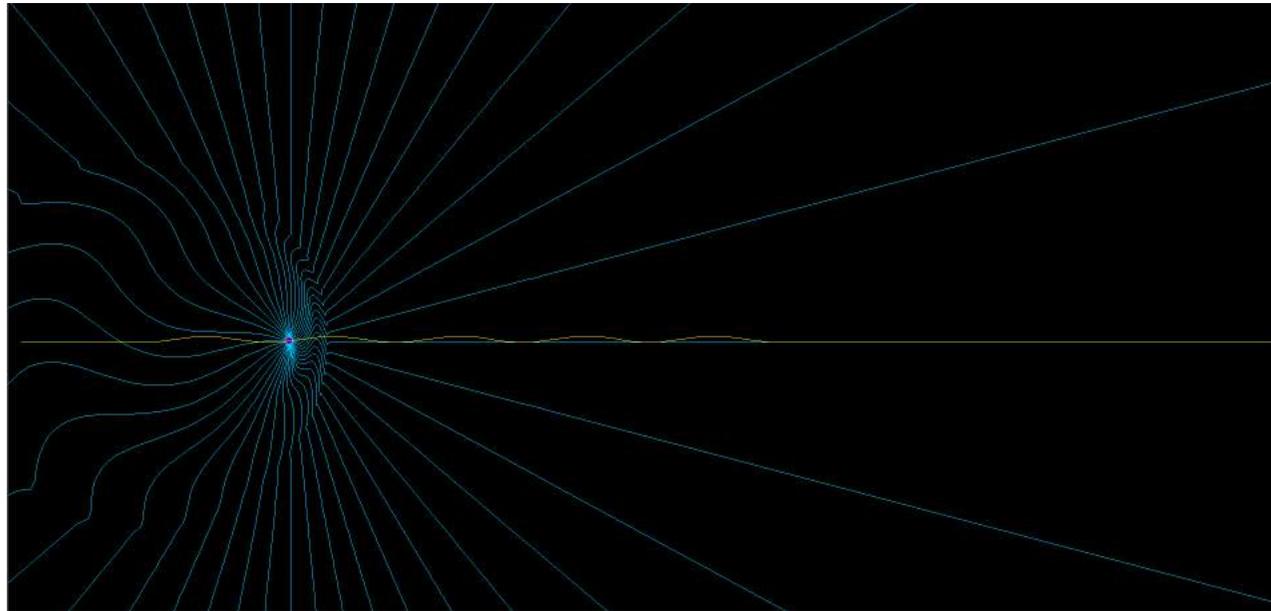
# RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: ONDULATORE



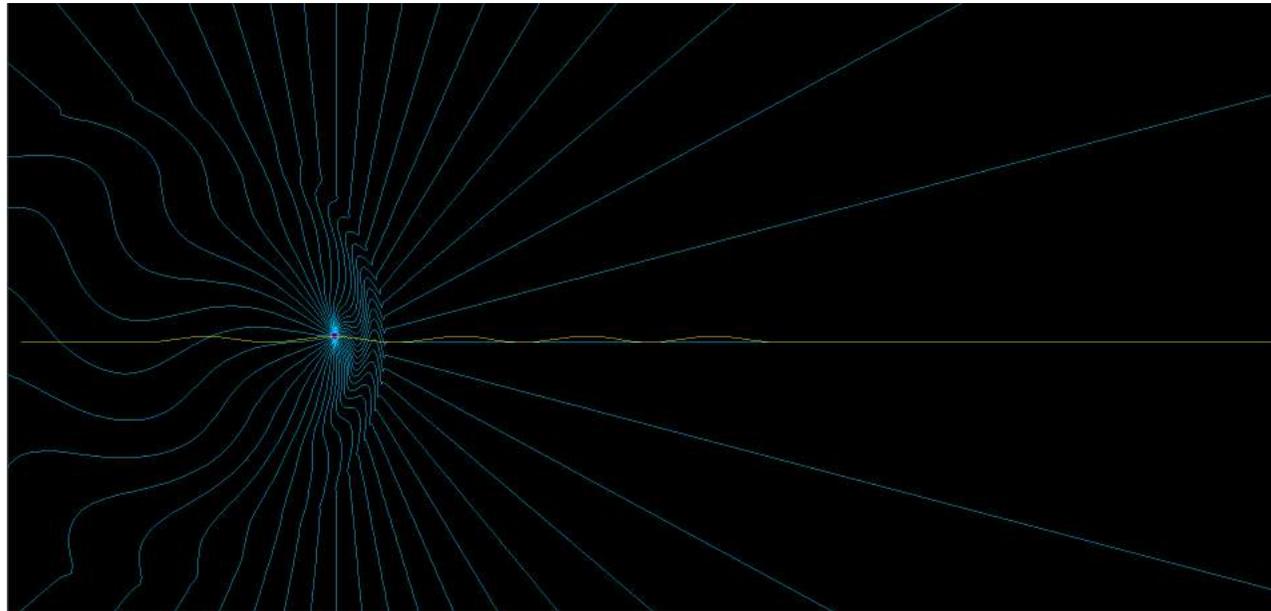
# RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: ONDULATORE



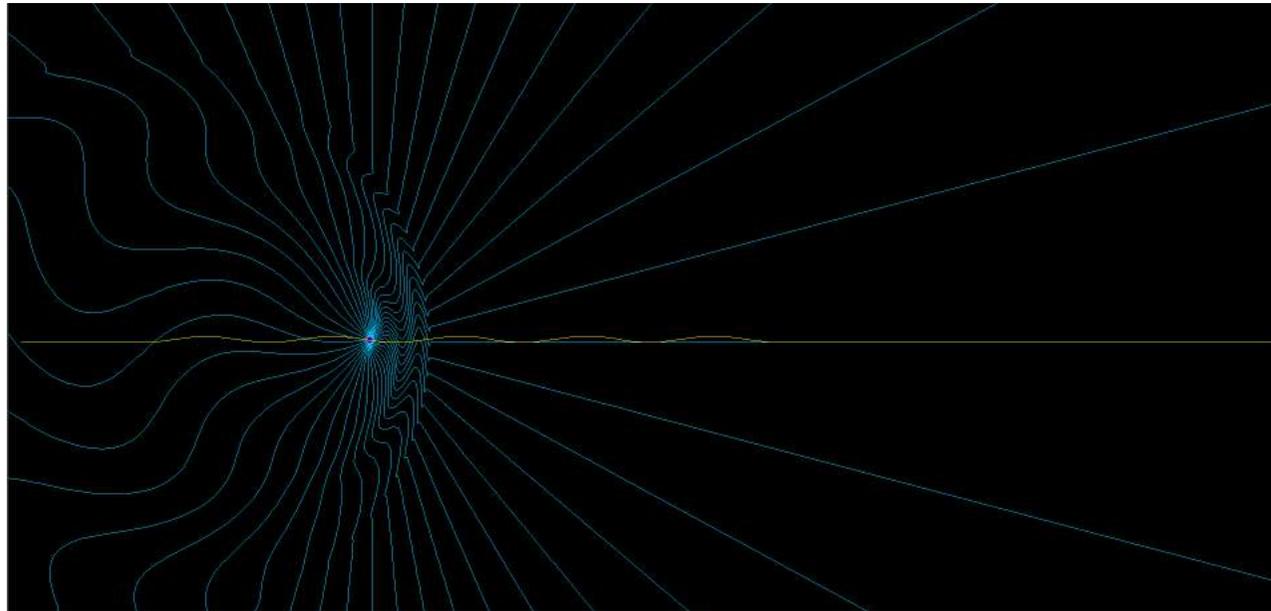
# RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: ONDULATORE



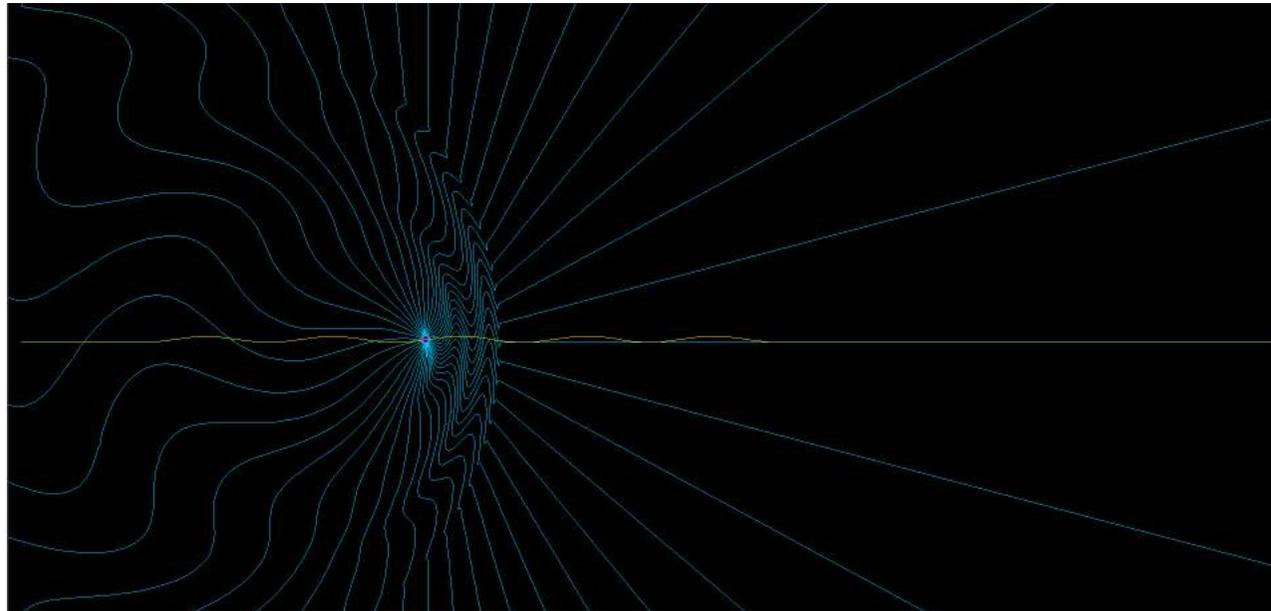
# RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: ONDULATORE



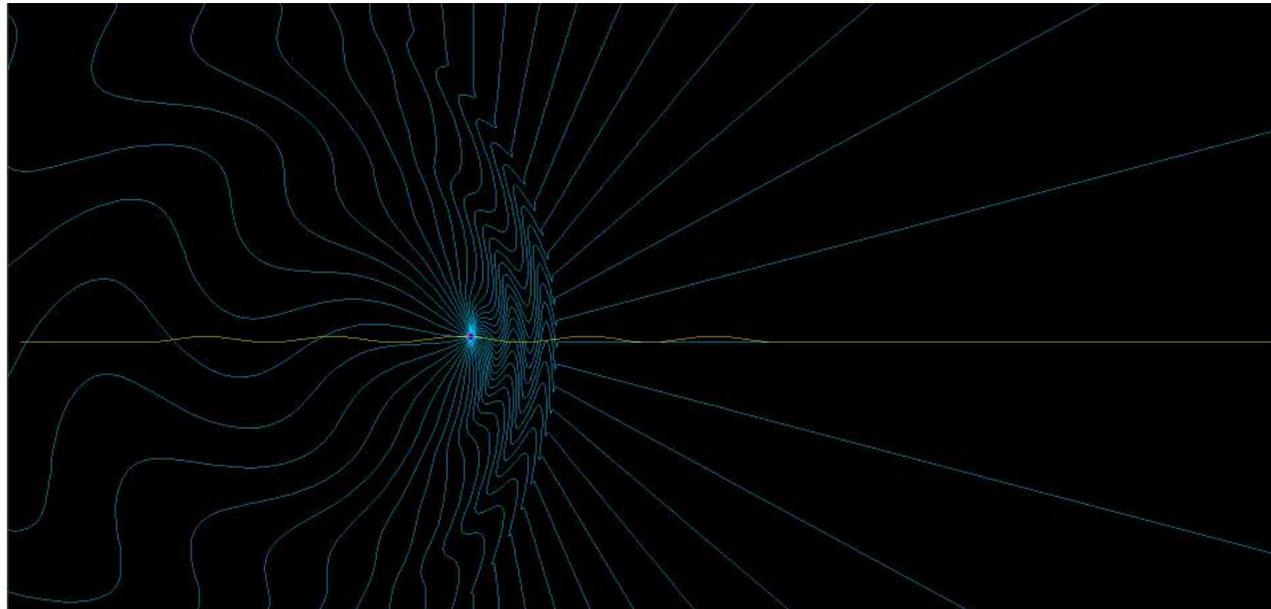
# RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: ONDULATORE



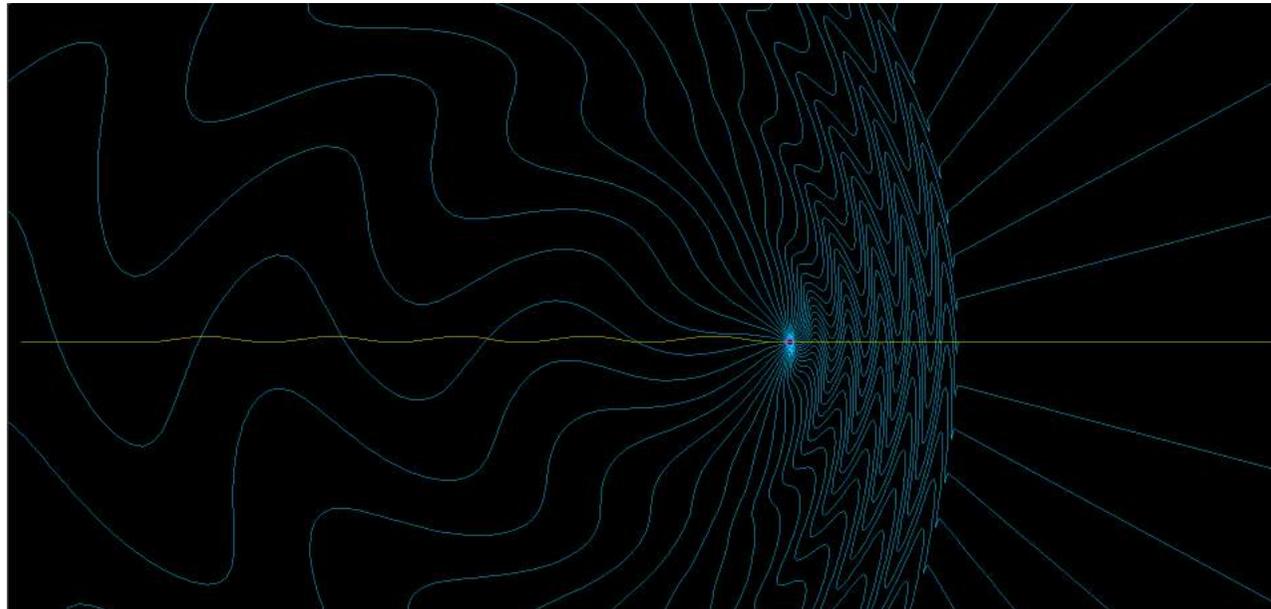
# RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: ONDULATORE



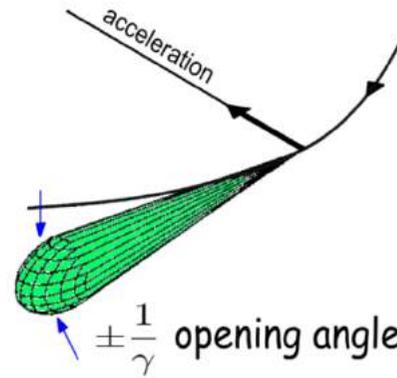
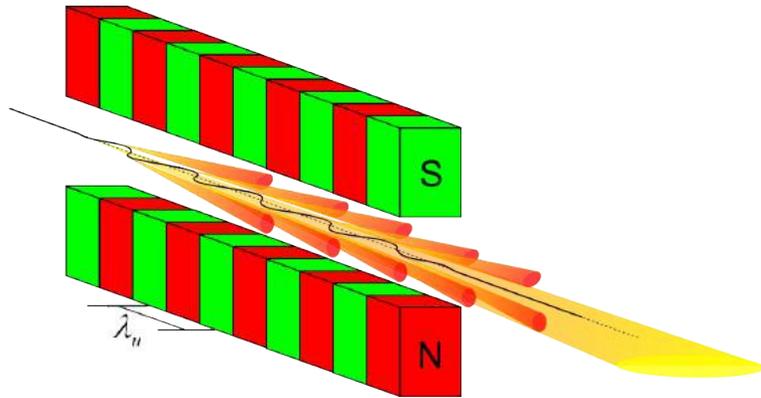
# RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: ONDULATORE



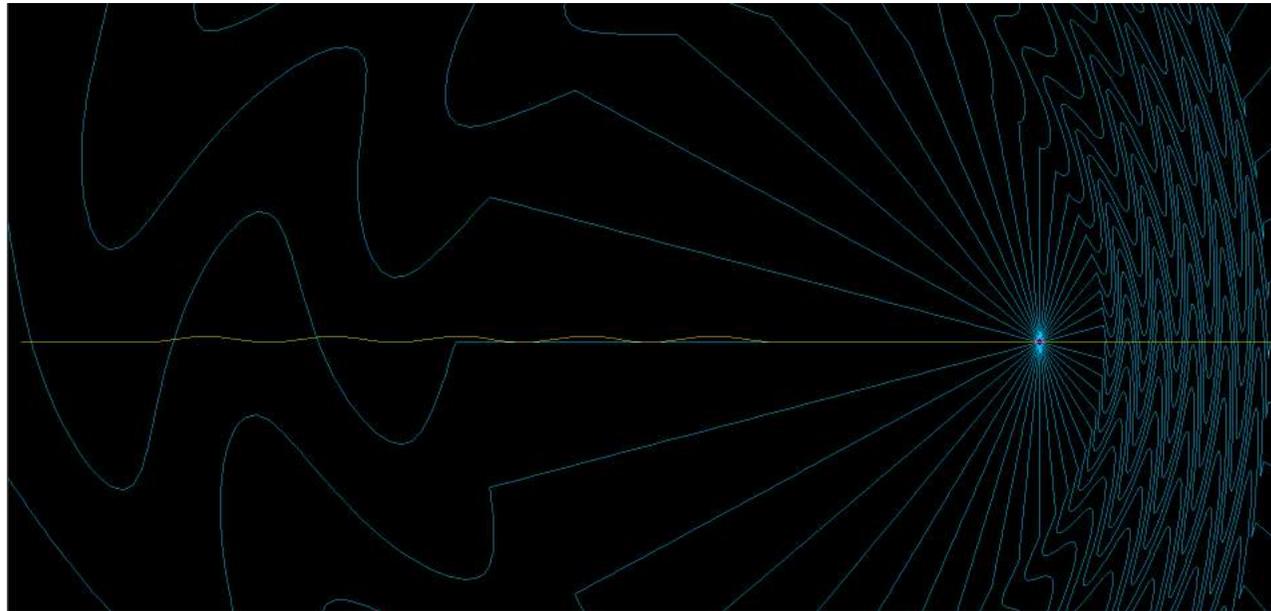
# RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: ONDULATORE



# RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: ONDULATORE

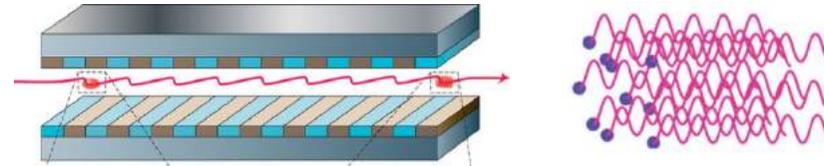
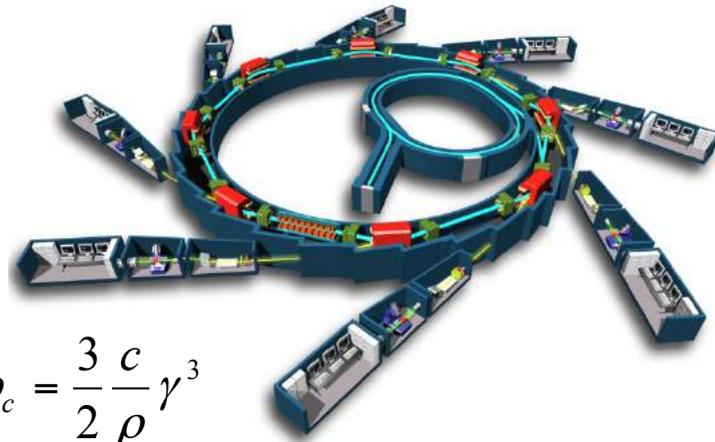


$$L_{pulse} = N_u \lambda_{rad}$$



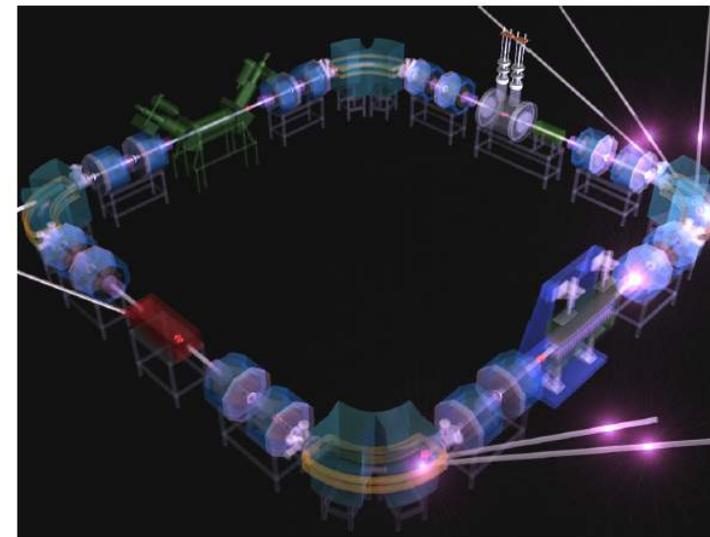
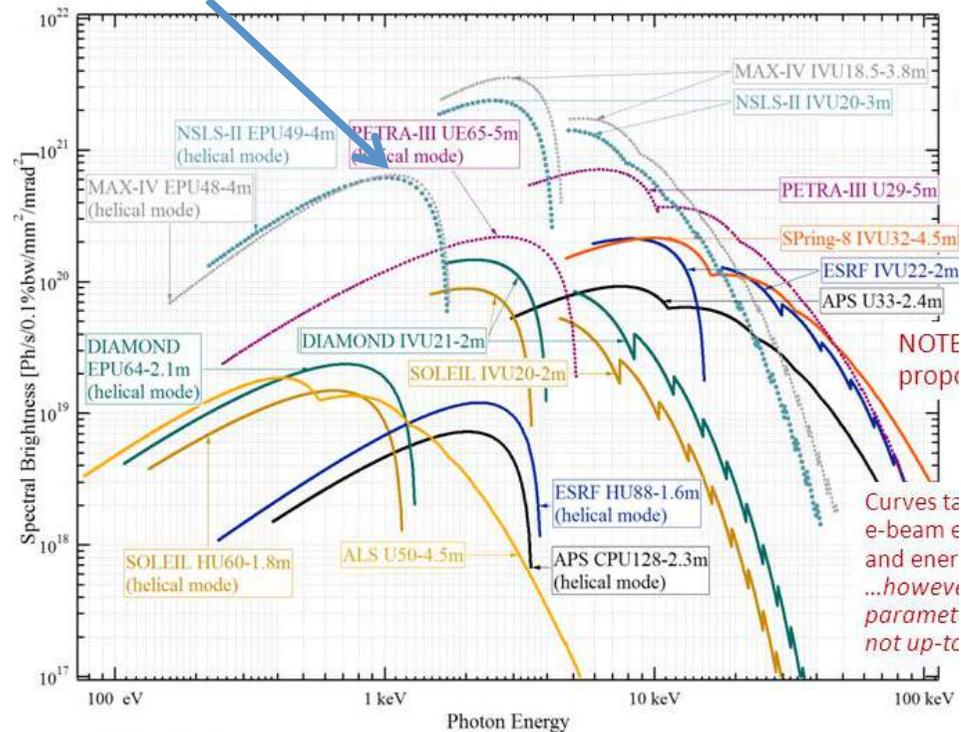
# PROPRIETA' DELLA RADIAZIONE DI SINCROTRONE

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 ( $\gamma^3$ ).



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

$$P_{rad} = \frac{2}{3} \frac{cq^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{\beta^4 \gamma^4}{\rho^2}$$

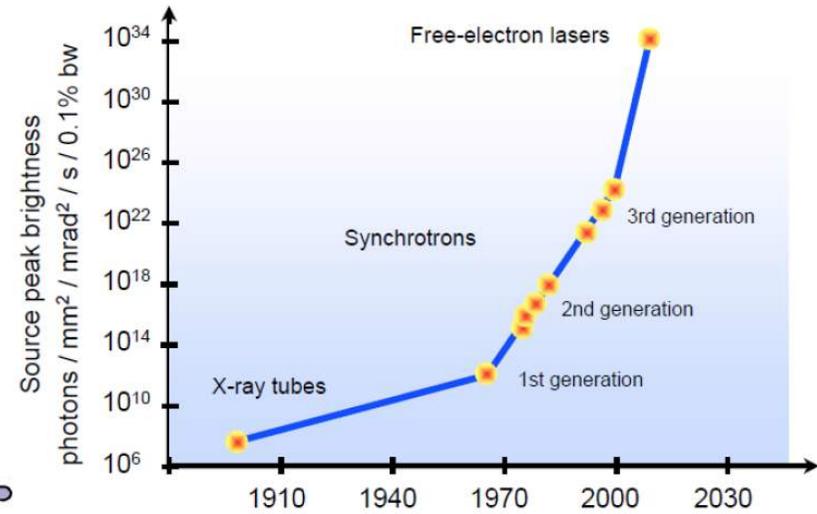
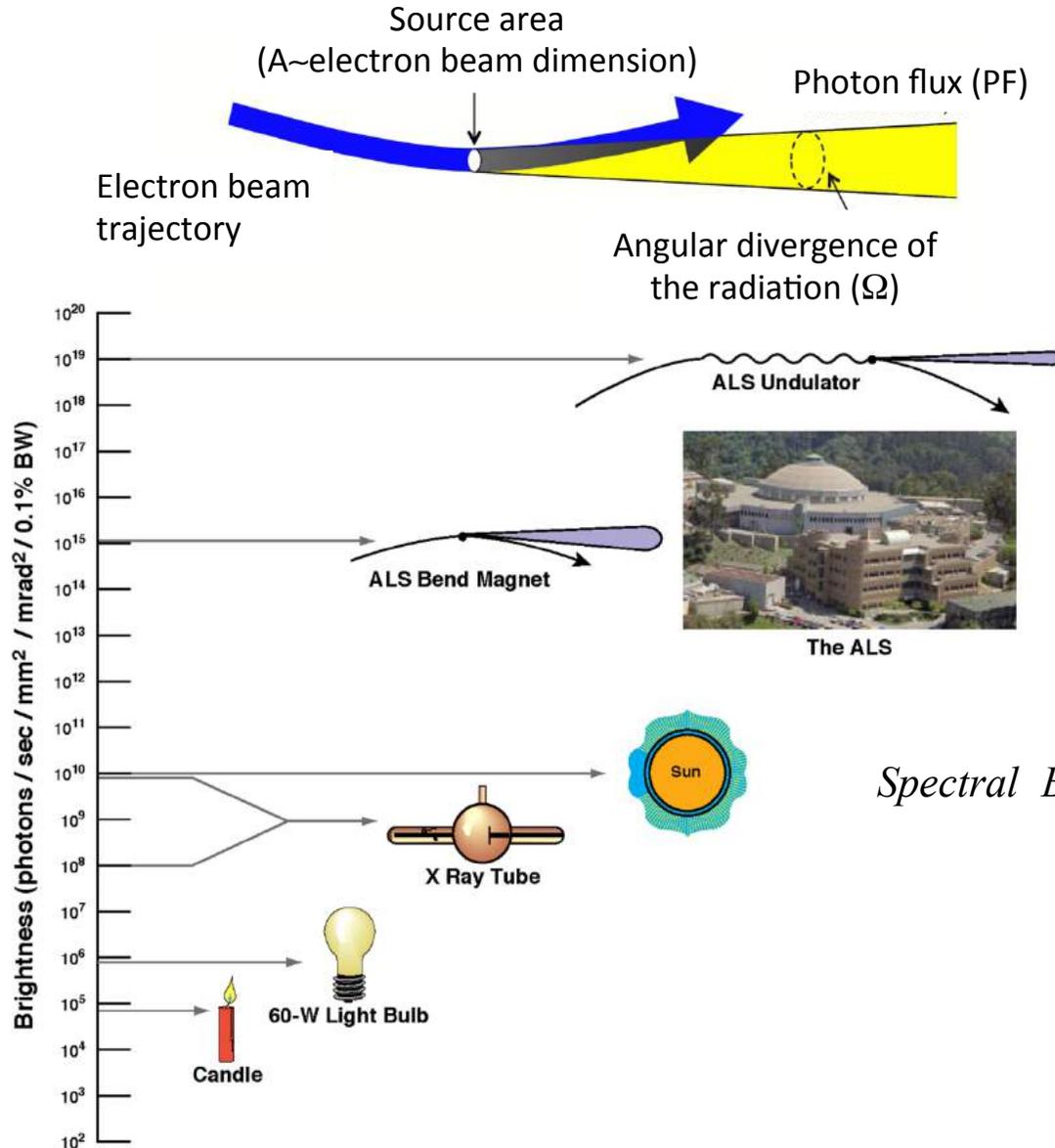




<http://www.isa.au.dk/animations/animations.asp>

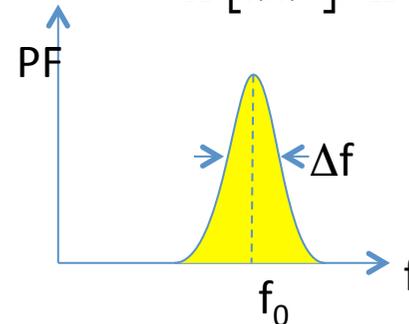
# BRIGHTNESS OF A PHOTON SOURCE

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



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

$$\text{Spectral Brightness} = \frac{PF [ph/s]}{A [mm^2] \times \Omega [mrad^2] \times 0.1\% BW}$$



$$BW = \Delta f / f_0 [\%]$$

# SINCROTRONI DEDICATI ALLA “PRODUZIONE” DI LUCE



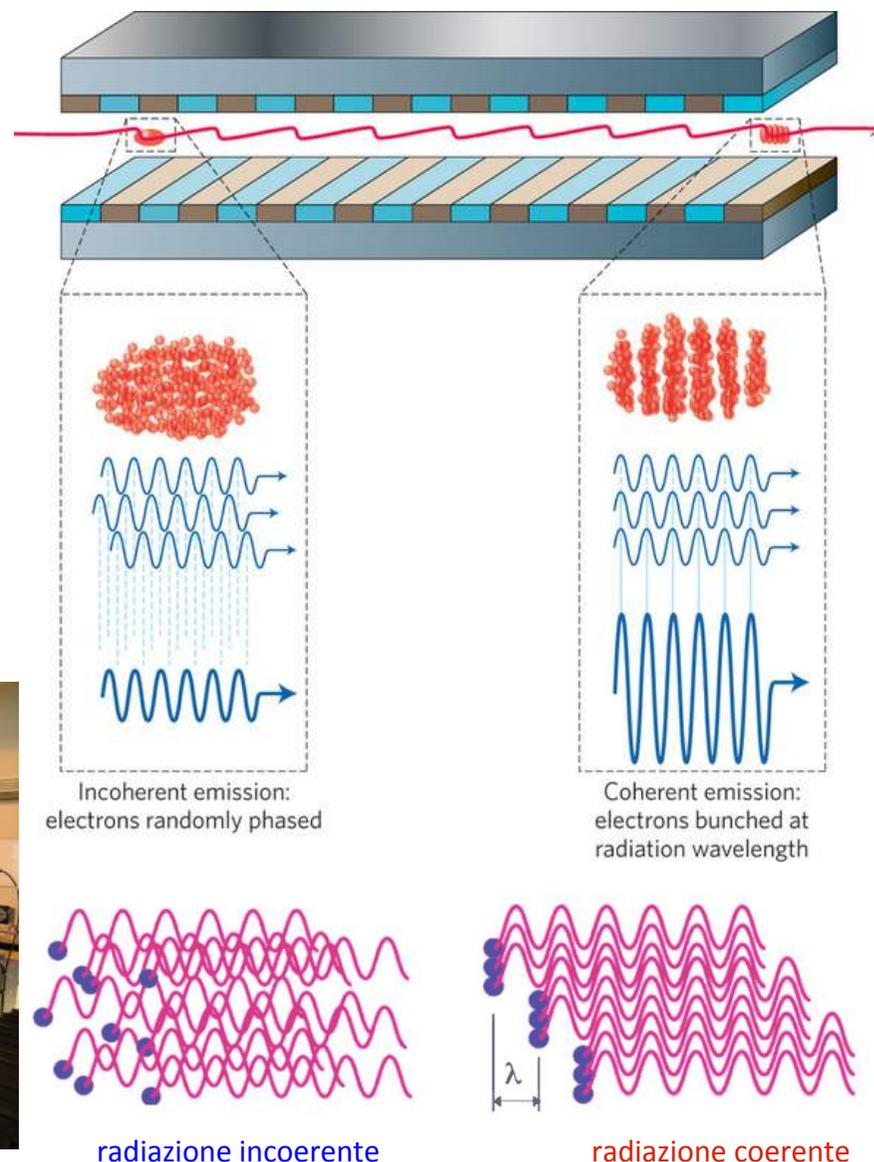
# Laser ad elettroni liberi: *Free Electron Lasers (FEL)*

I Laser ad Elettroni Liberi sono *potenti sorgenti di radiazione elettromagnetica coerente* (microonde, UV, raggi X) con *alta potenza di picco e alta brillantezza* (ordini di grandezza superiori agli anelli di luce di sincrotrone).

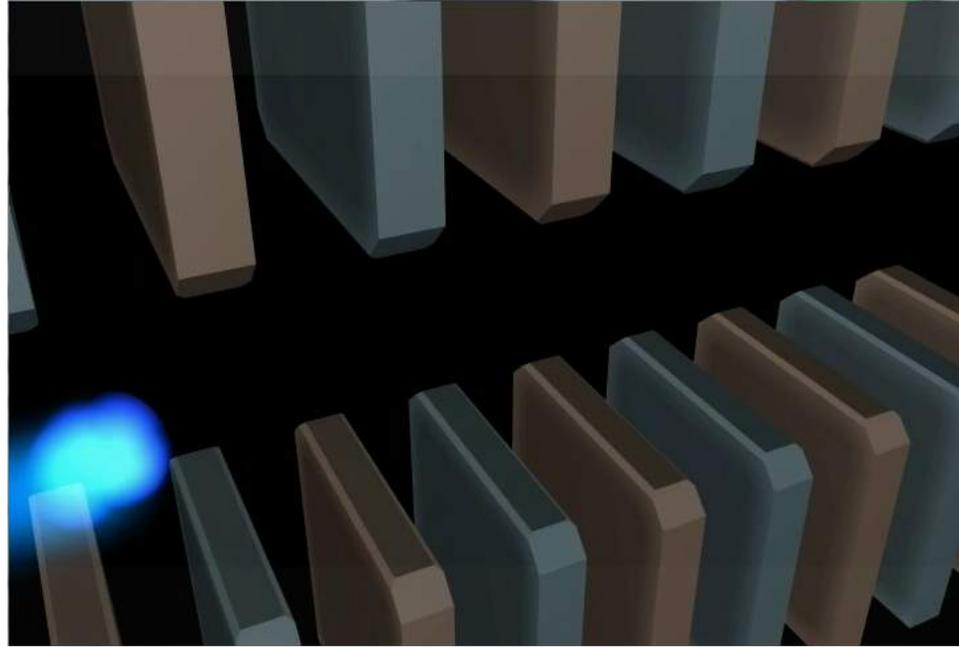
Un **LINAC ad e-** accelera pacchetti di elettroni di alta qualità (brillantezza) che, entrando nell'ondulatore, generano radiazione EM coerente, con un'amplificazione esponenziale.

All'interno degli ondulatori si ha in particolare una interazione luce emessa-elettroni del pacchetto che porta ad un fenomeno di **auto-impacchettamento (micro-bunching)** del pacchetto di elettroni su scala della lunghezza d'onda della radiazione emessa. I vari elettroni impacchettati emettono così coerentemente.

Tale tipo di radiazione ha enormi applicazioni poiché consente analisi di strutture anche non cristallizzate.



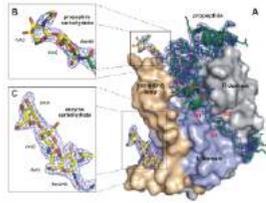
# FEL: video



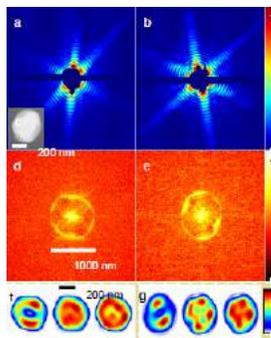
# FEL: RADIAZIONE COERENTE ED IMPULSI ULTRA-CORTI

⇒ la **radiazione coerente** emessa da un FEL consente di «fotografare» anche molecole o sistemi non cristallizzati

⇒ con i FEL è possibile generare **impulsi ultra-corti** (fs) con cui è possibile «filmare» movimenti di molecole, passaggi di carica etc...

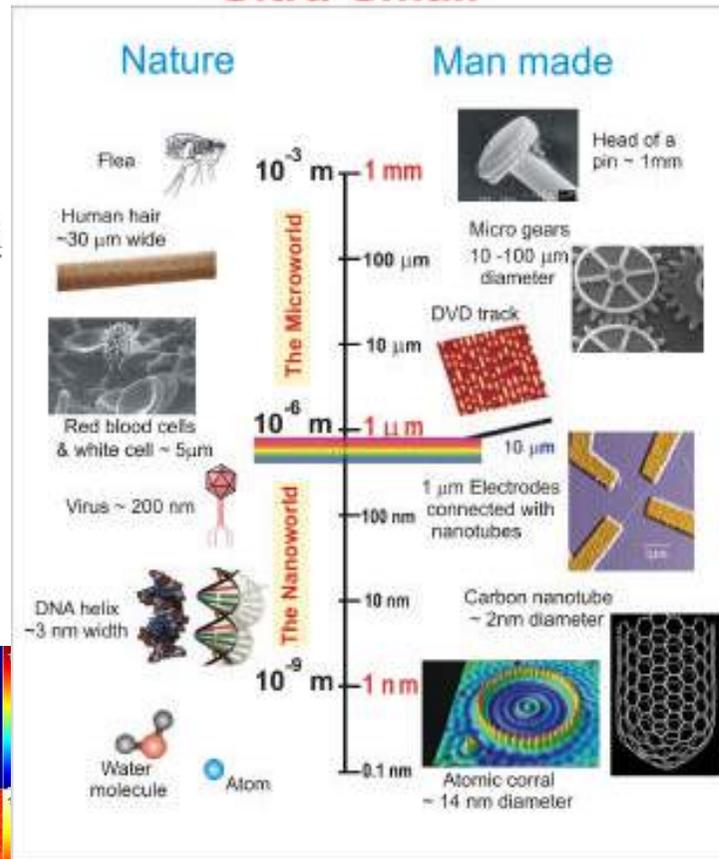


Inhibited Trypanosoma brucei Cathepsin B Structure Determined by Using an Xray Laser, L. Redecke et al. Science 339, 227 (2013)

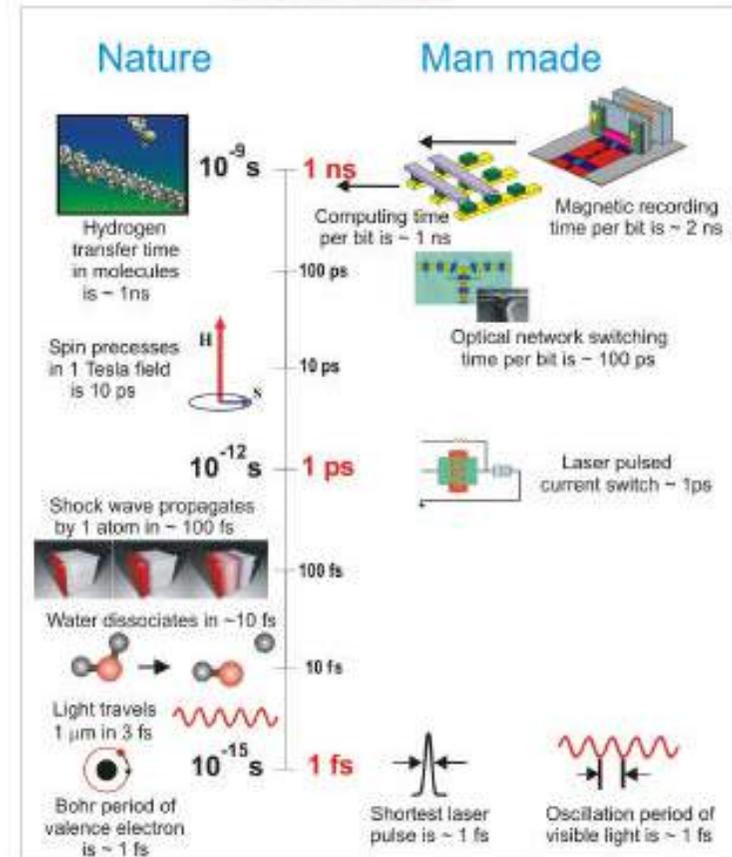


Imaging single mimivirus Seibert et al, Nature, 470, 78 (2011)

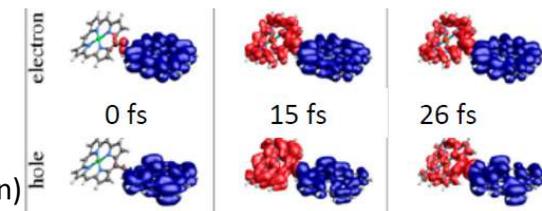
## Ultra-Small



## Ultra-Fast

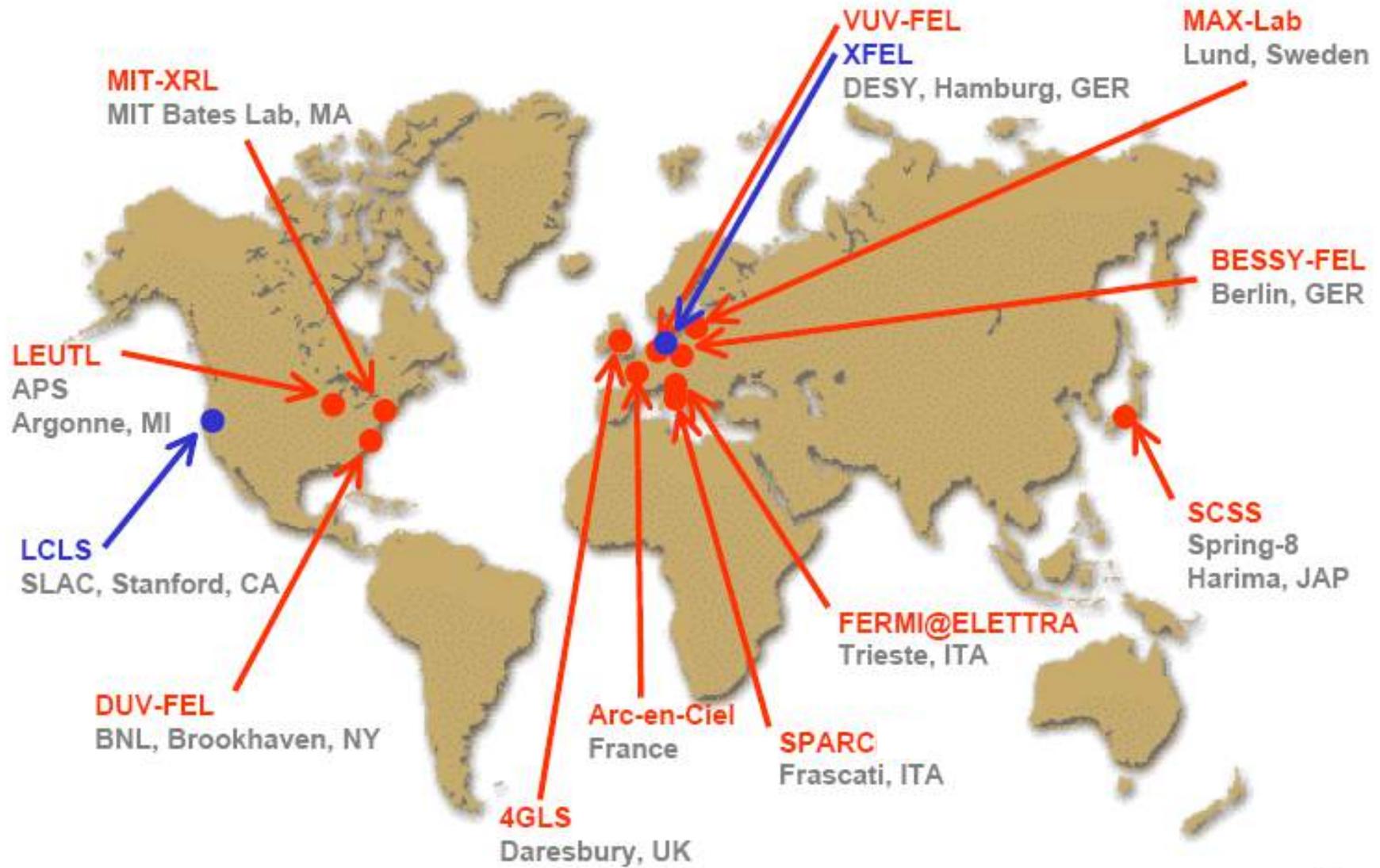


Simulated X-ray Raman Redistribu'on: (example: Metalloporphyn)



Courtesy C. Pellegrini and J. Stohr

# FEL nel mondo

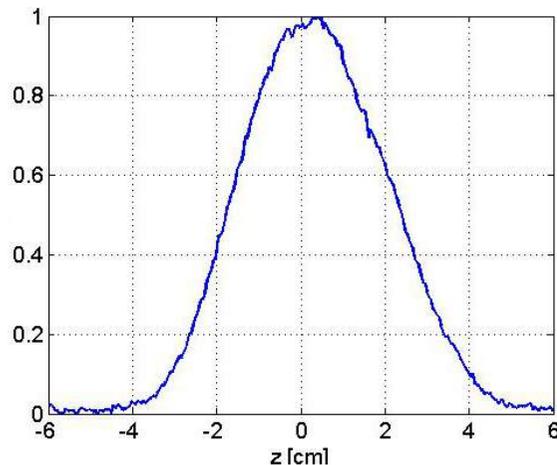


# GAUSSIAN DISTRIBUTION OF ELECTRON BUNCHES IN ELECTRON RINGS

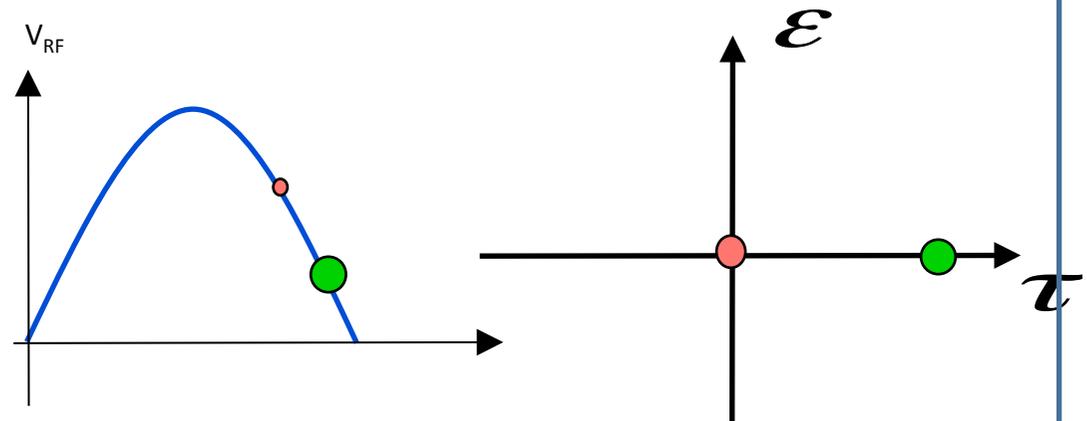
The **synchrotron light emission** in electron (or positron) rings leads to a series of **consequences**:

→ The particles lose energy at each turn and this energy must be supplied to the beam by the **accelerating cavity** to avoid that the particles, becoming less energetic, are lost.

At the end we arrive at a situation of equilibrium between these two opposite phenomena which tends to make the electrons bunches with a **gaussian profile**

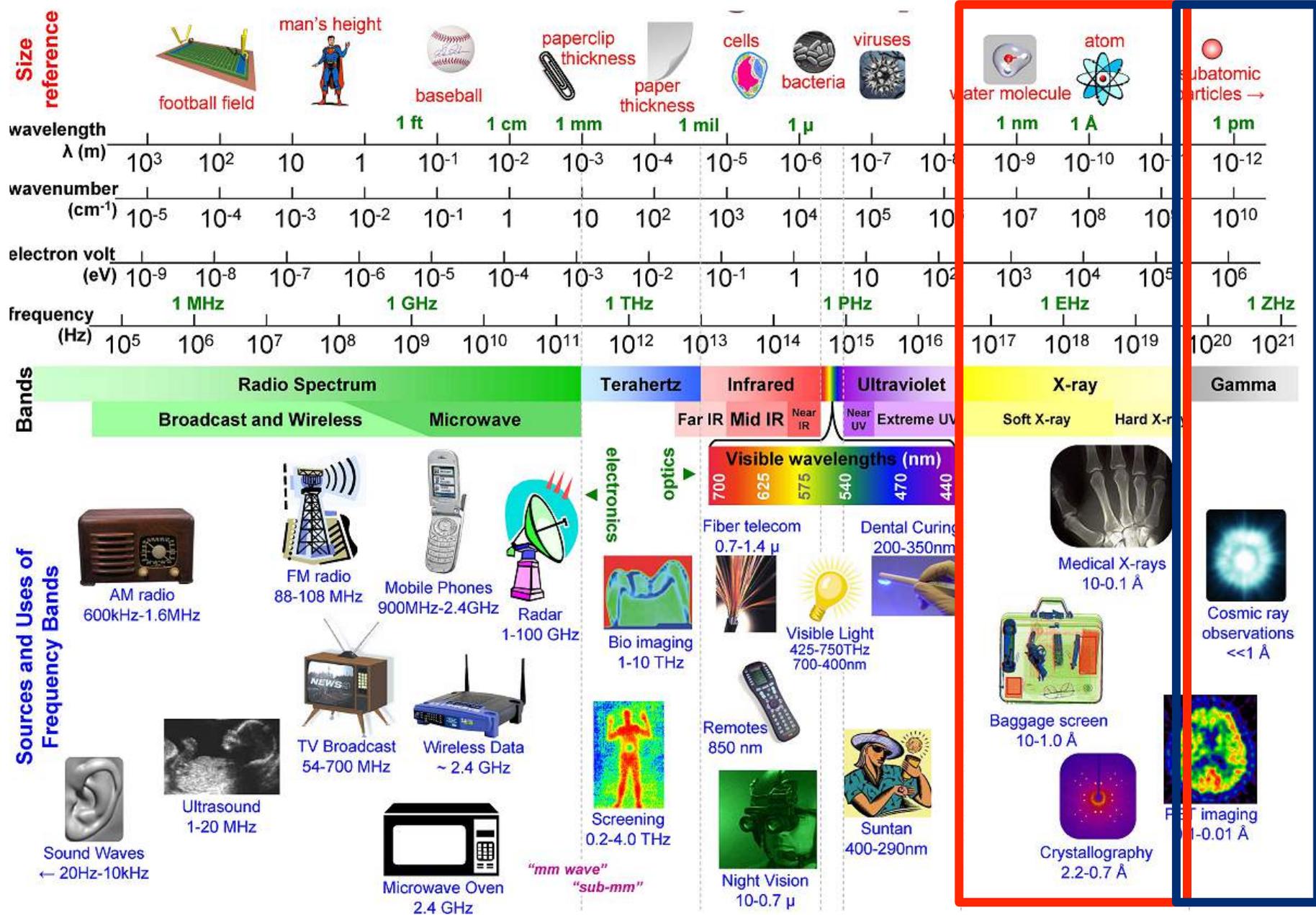


→ Since the emission depends on the energy of the particle, there is a **damping effect** on the amplitude of the synchrotron oscillation (radiation damping) which would tend to bring all the particles on the synchronous phase (damped oscillator system).

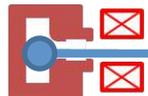


→ On the other hand, since radiation is emitted in the form of quanta of light, it generates a "noise" (**quantum excitation**) that would tend to increase the amplitude of the oscillation.

# LUCE A DIVERSA LUNGHEZZA D'ONDA: RAGGI $\gamma$



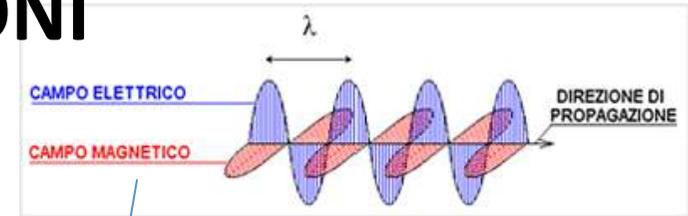
# SORGENTI DI RAGGI X E $\gamma$ BASATE SU COLLISIONI ELETTRONI-FOTONI



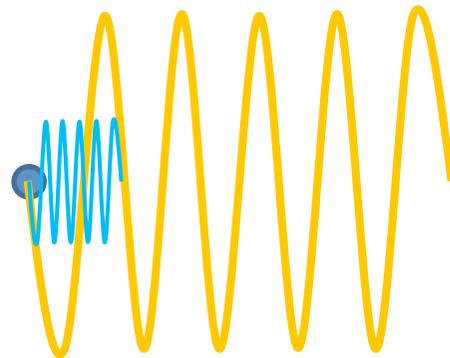
Sorgente di elettroni



LINAC (100-800 MeV)



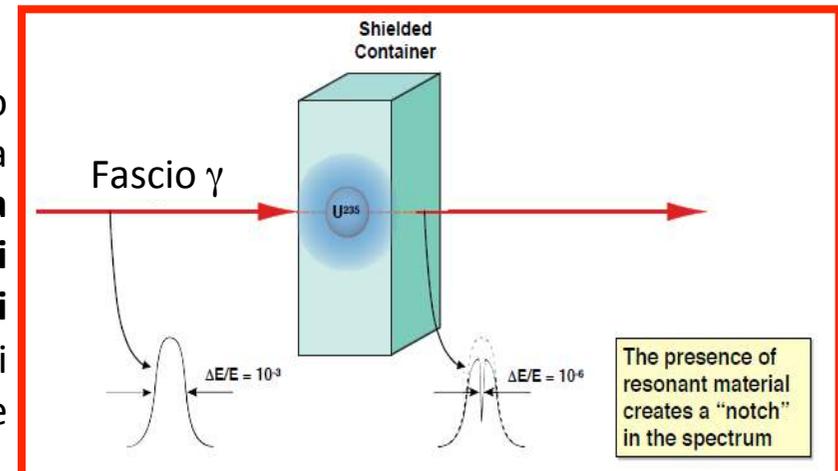
LASER



Il fascio di fotoni emesso può coprire uno spettro di radiazione dai raggi X ai raggi  $\gamma$



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



# ACCELERATORI PER SORGENTI DI NEUTRONI

**The Nobel Prize in Physics 1994**

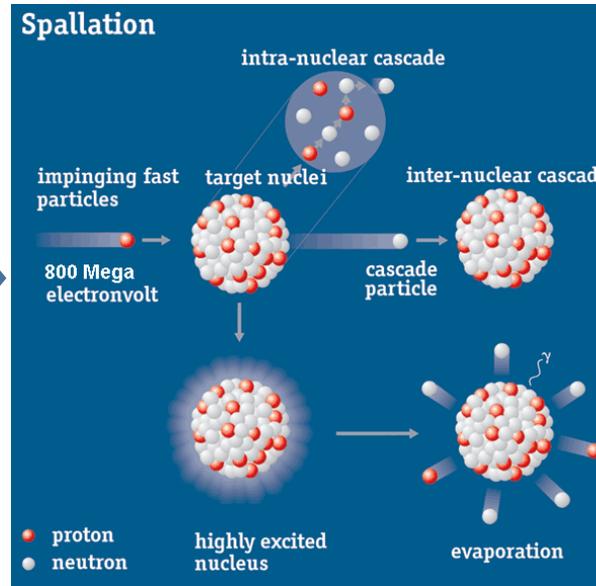
*Neutrons behave like particles and waves*

The Royal Swedish Academy of Sciences has awarded the 1994 Nobel Prize in Physics for pioneering contributions to the development of neutron scattering techniques for studies of condensed matter.

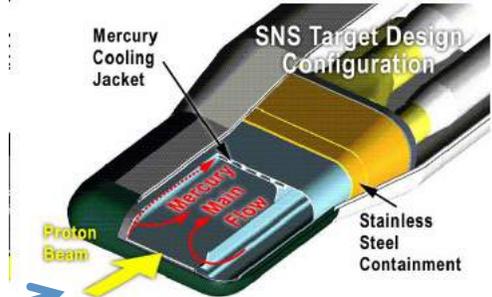
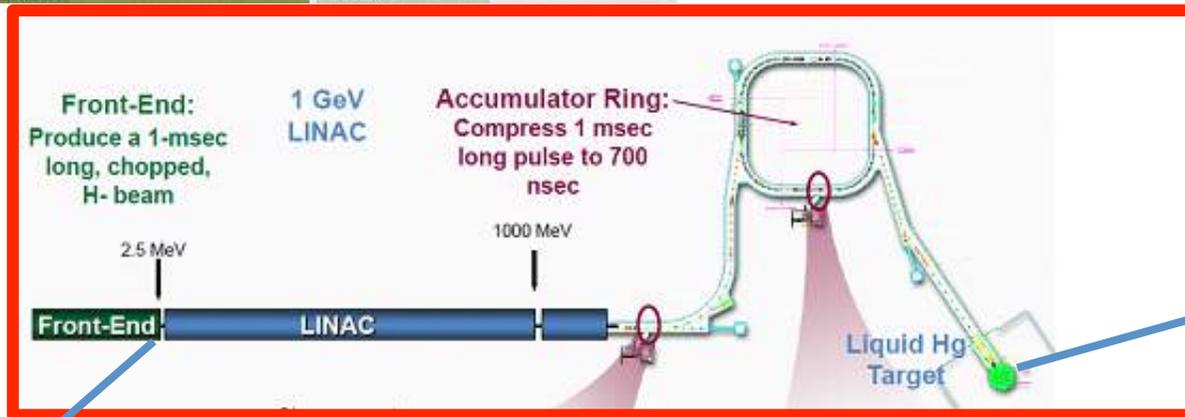
**Neutrons reveal structure and dynamics**

Neutrons show where atoms are. Neutrons show what atoms do.

Small nuclei use of atoms... Neutrons source against atomic nuclei... Neutrons show where atoms are... Neutrons show what atoms do... Research reactor... Neutrons reveal laser structure... Neutrons show what atoms do... Further reading...



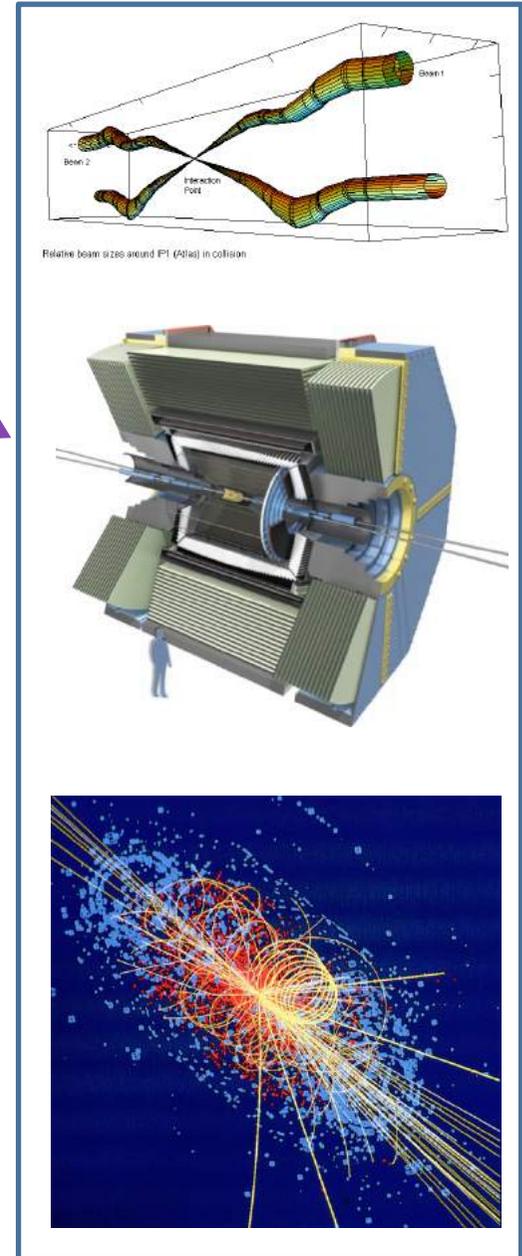
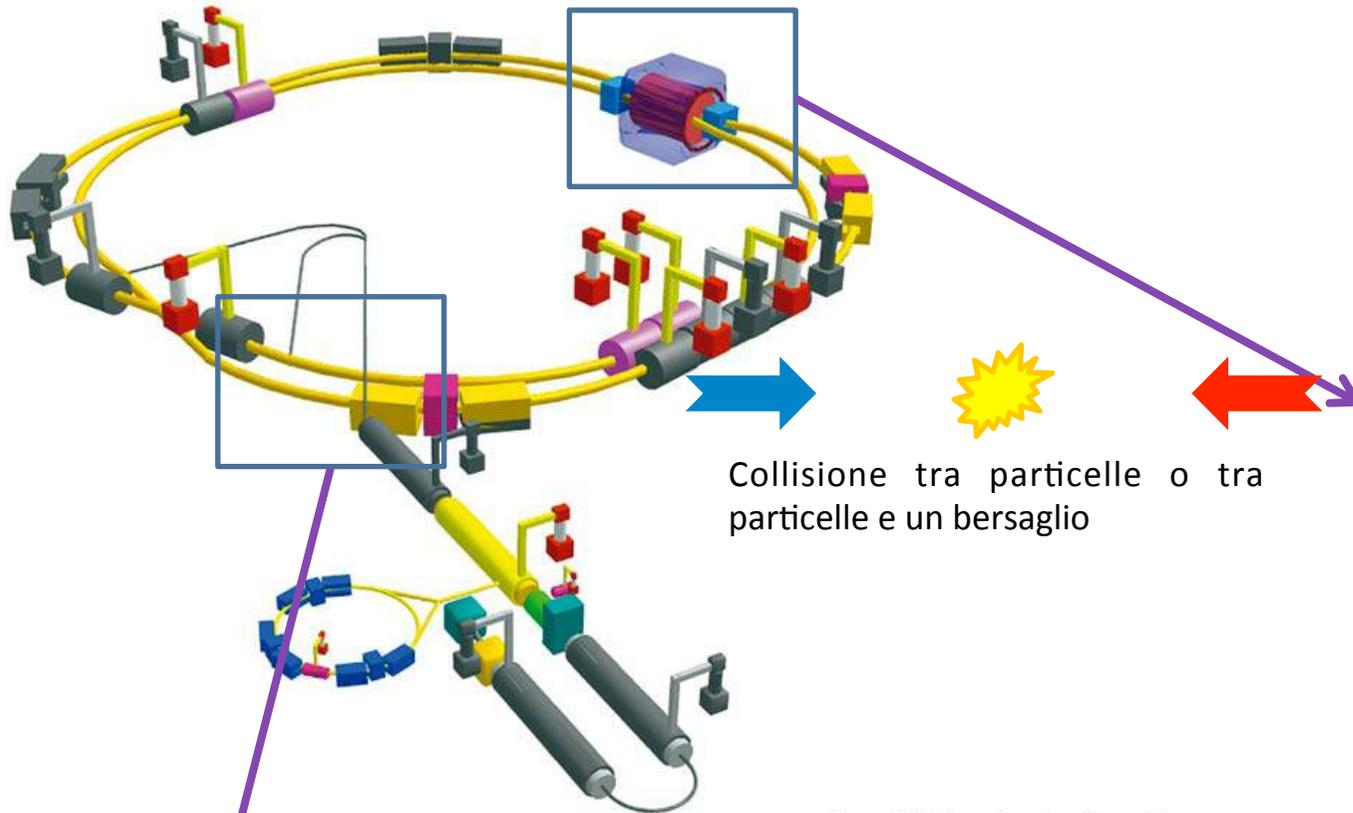
spallazione



$10^{15}n/s/cm^2$



# FISICA FONDAMENTALE: COLLISORI (COLLIDERS)

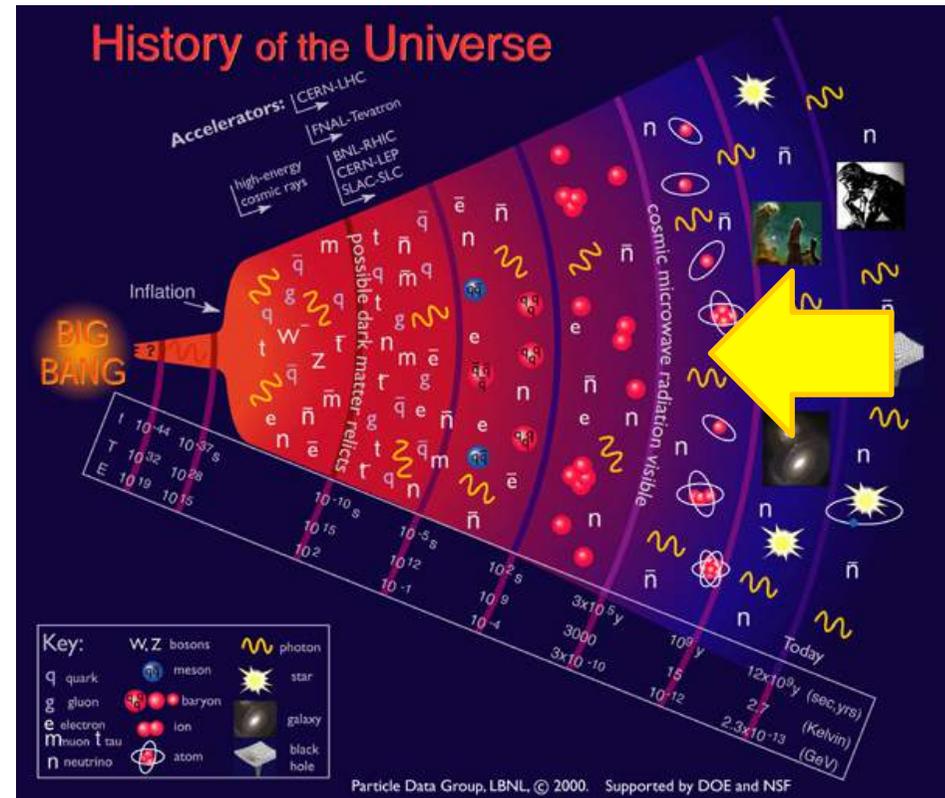
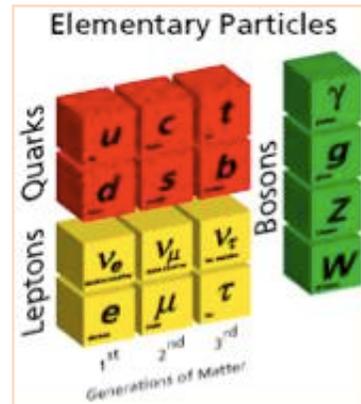
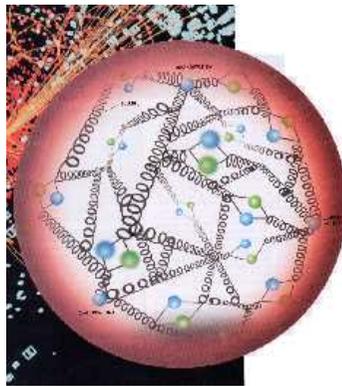


# ACCELERATORI DI PARTICELLE: MICROSCOPI SUB-ATOMICI E MACCHINE DEL TEMPO

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 600 g lanciato a 300 m/s ha un'energia di 27000 J



Ma ogni singolo protone o neutrone del proiettile ha una energia cinetica piccolissima  $27000/N_{p+n} \approx 8 \cdot 10^{-22} \text{ J} \approx 0.005 \text{ eV!}$



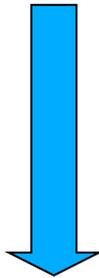
In un **acceleratore come LHC** si raggiungono energie per ogni protone di 7 TeV ( $7 \times 10^{12}$  eV)!

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

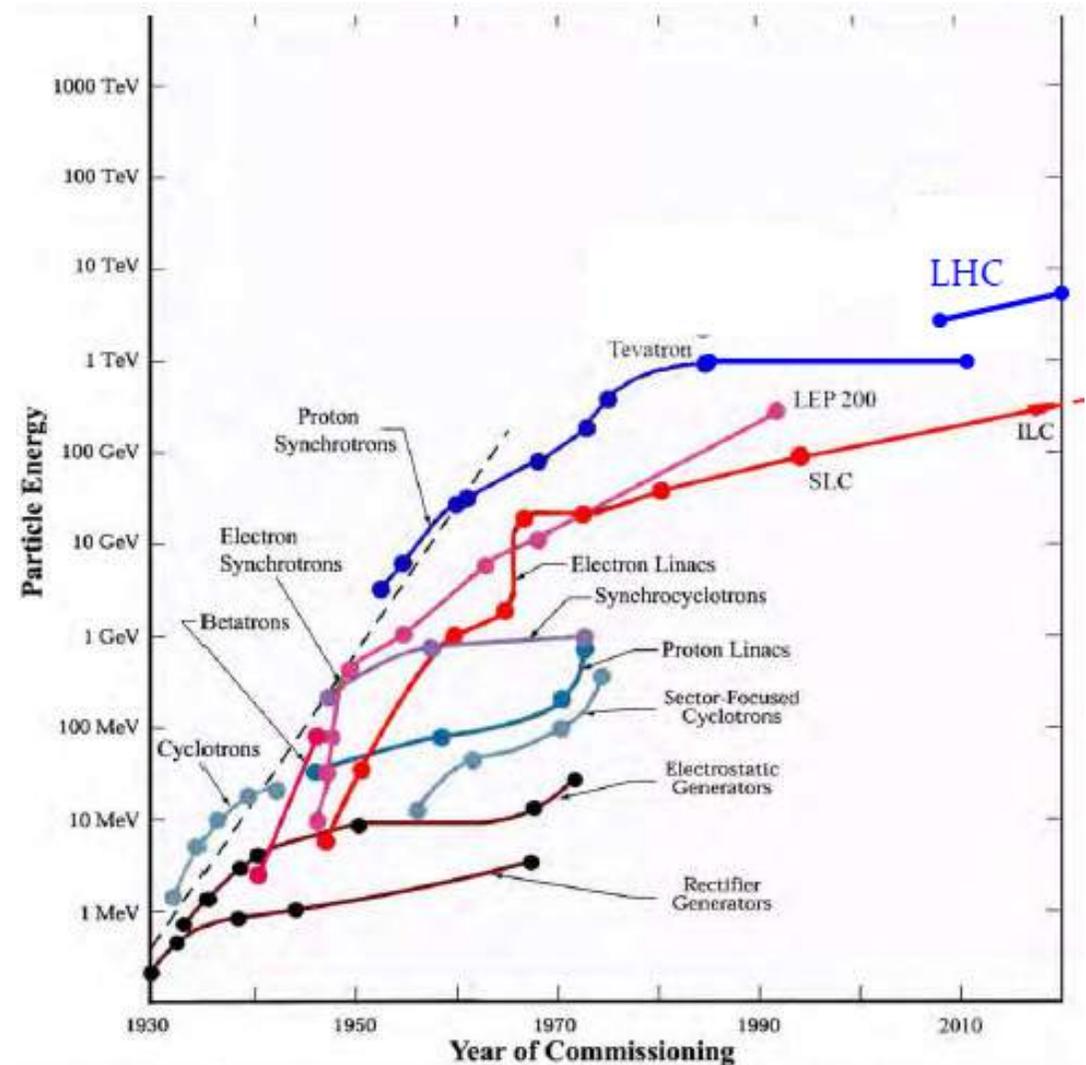


# SVILUPPO DEGLI ACCELERATORI DI PARTICELLE

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



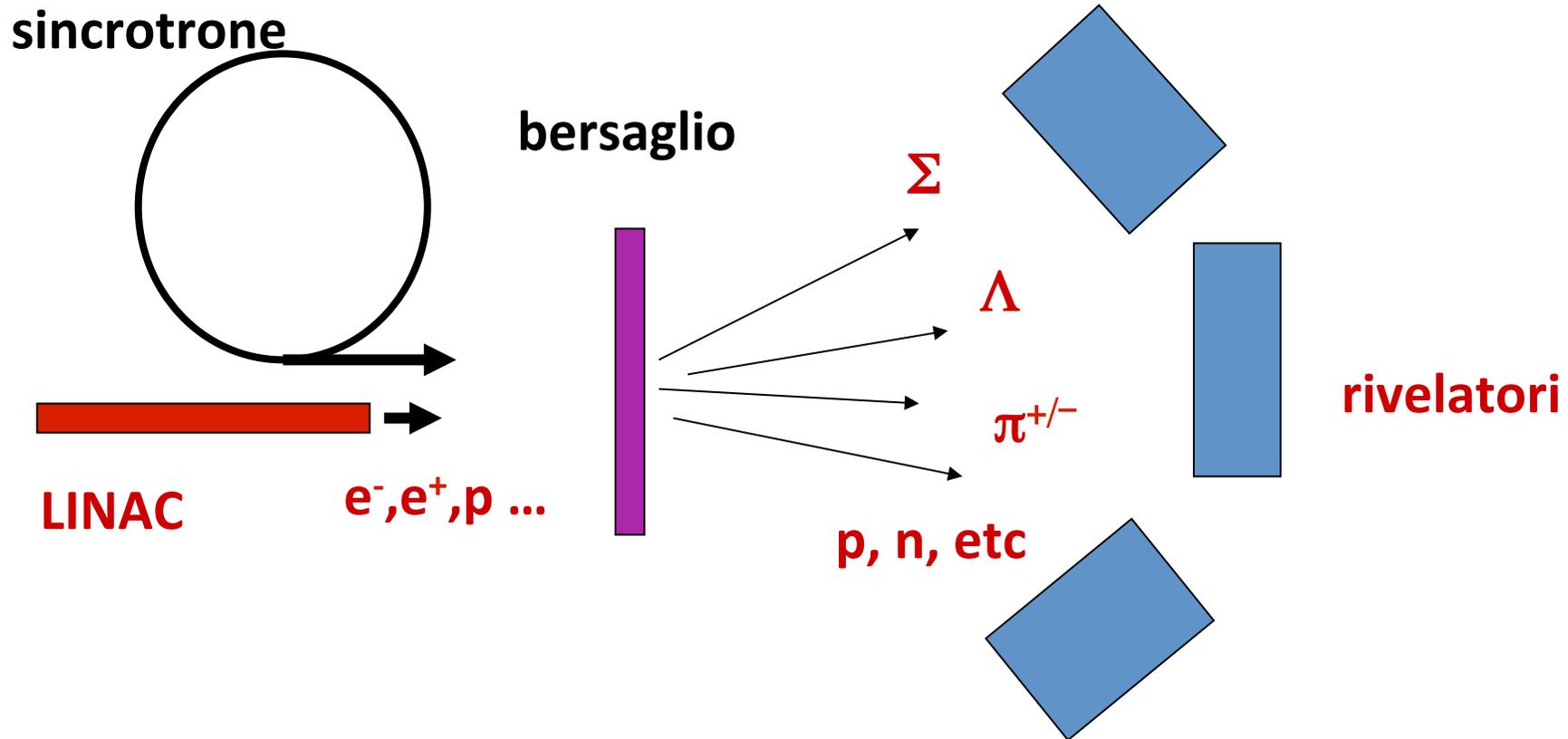
Lo sviluppo degli acceleratori per la fisica delle alte energie è stato determinato dalla necessità di ottenere energie e intensità di fasci sempre maggiori.



Courtesy M. Biagini

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

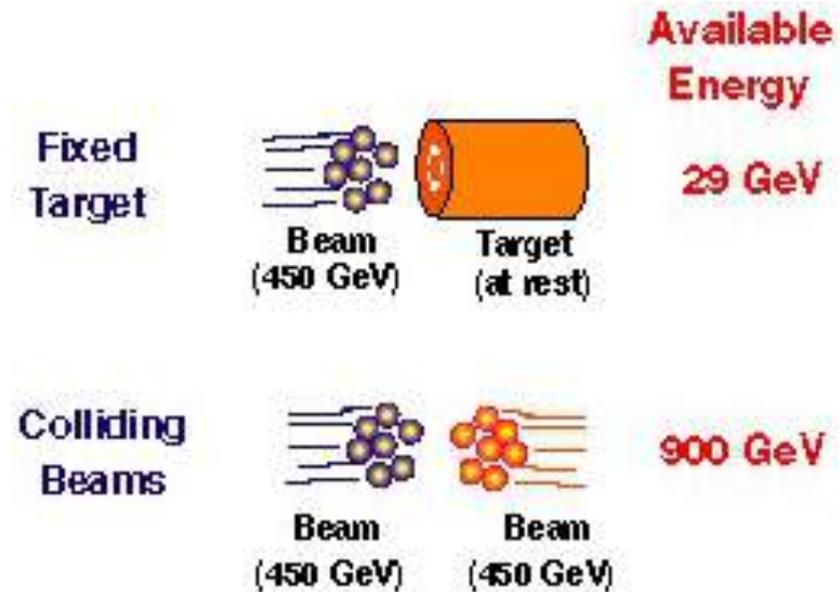
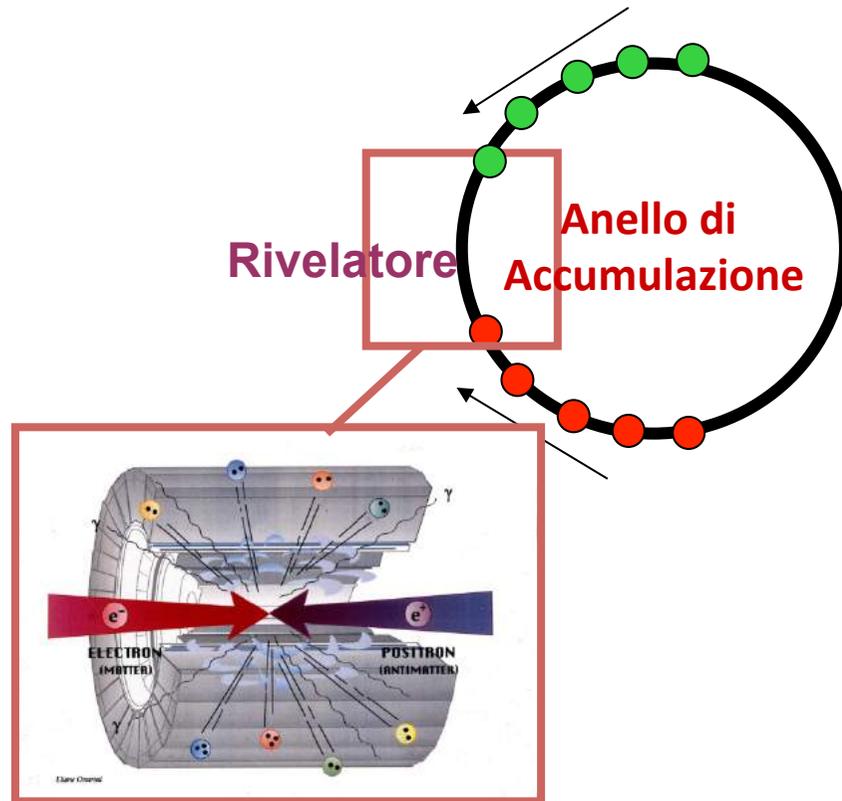
# Fisica delle Particelle con Acceleratori: collisioni su targhetta fissa



- 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;

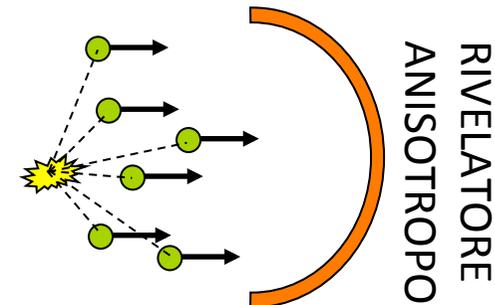
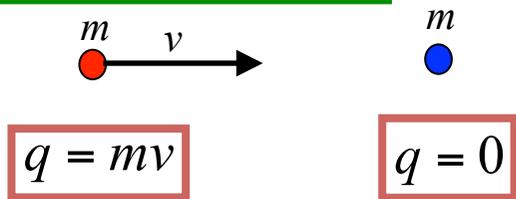
# NASCITA DEI MODERNI COLLIDER (COLLISORI)

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

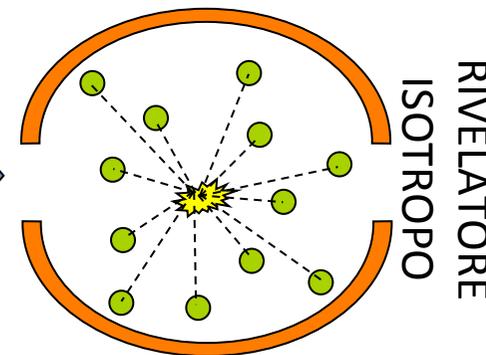
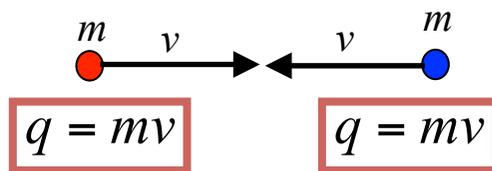
## COLLISIONE CONTRO BERSAGLIO FISSO



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 possono 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 foceggiamento debole in grado di far circolare particelle (e<sup>+</sup>/e<sup>-</sup>) 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. TUSCHKEK

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

(ricevuto il 7 Novembre 1960)

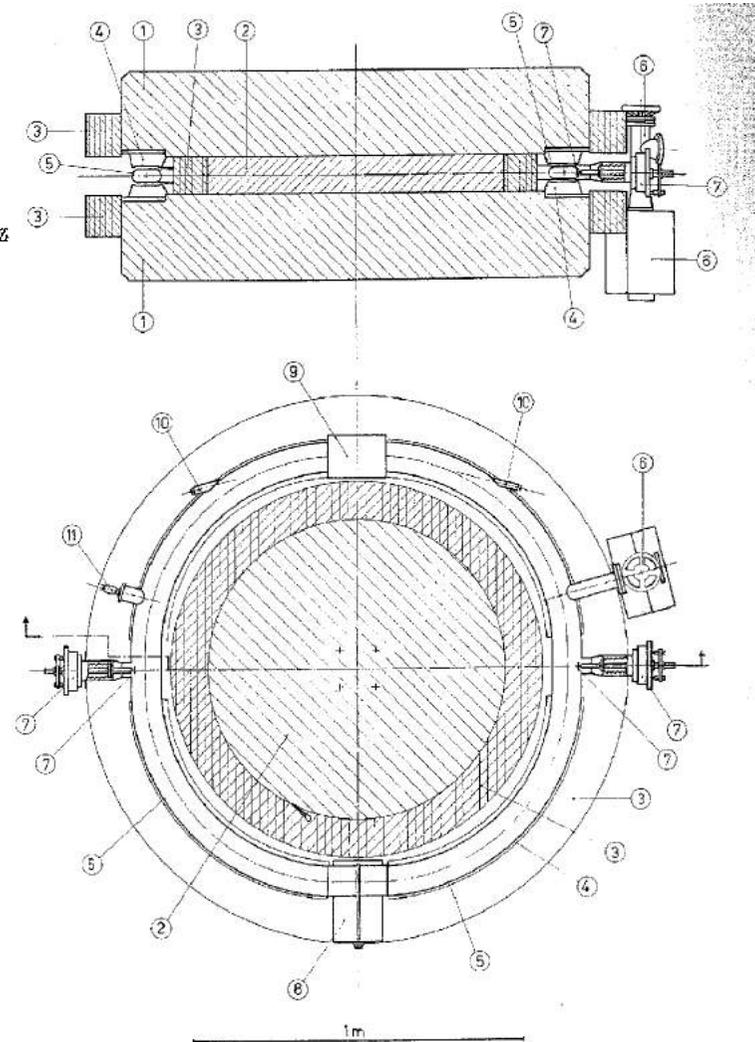
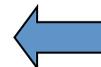
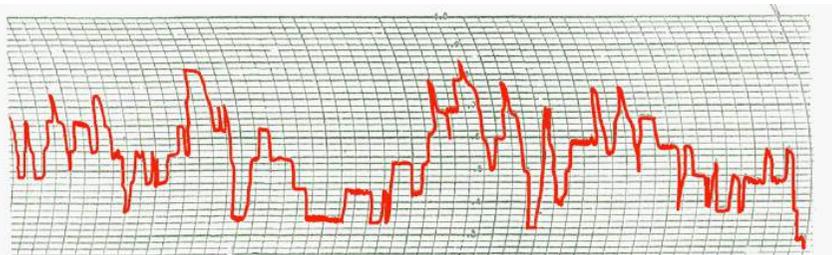


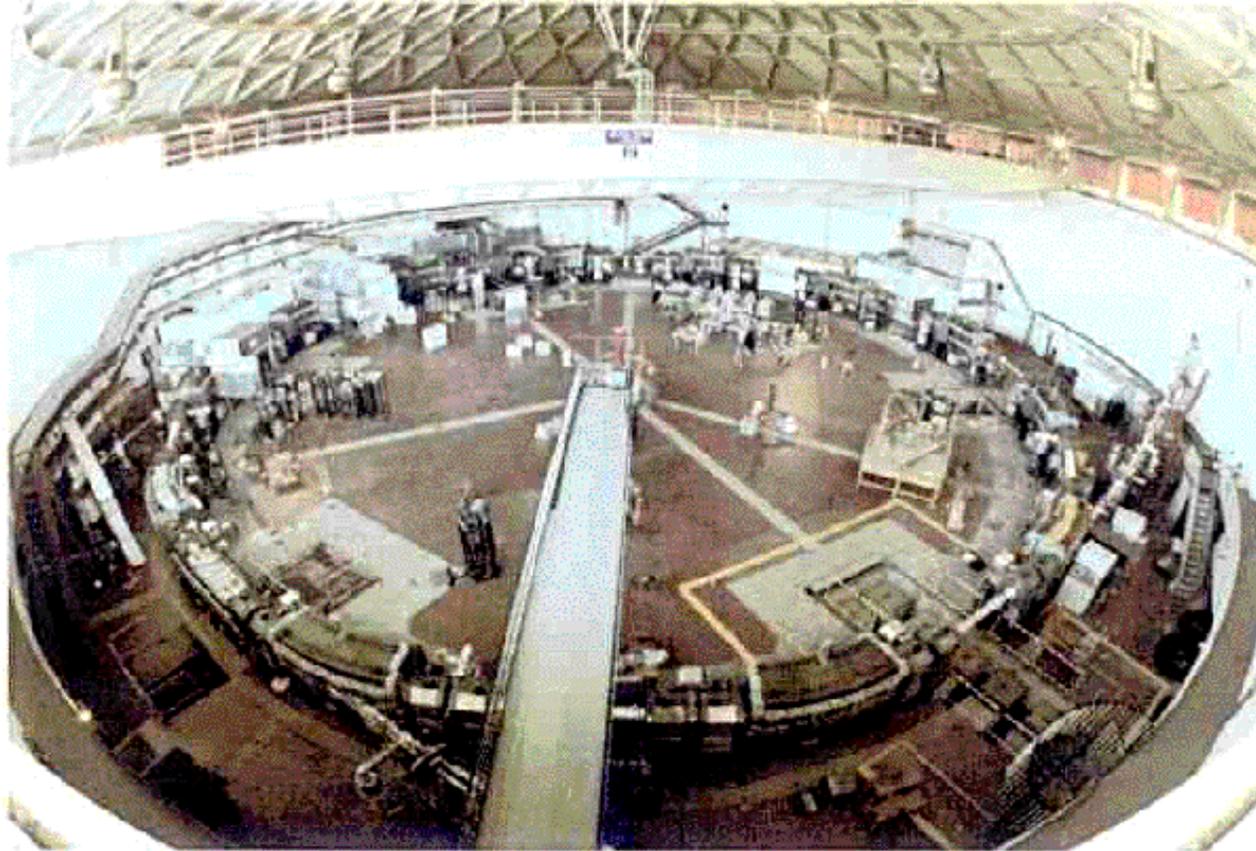
Fig. 1. - Elevation and plan section of the Frascati Storage Ring (anello di accumulazione - AdA): 1) magnet yoke; 2) magnet core; 3) coils; 4) polepieces; 5) doughnut; 6) titanium pump; 7) injection ports; 8) RF cavity; 9) experimental section; 10) windows for the observation of the synchrotron radiation;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

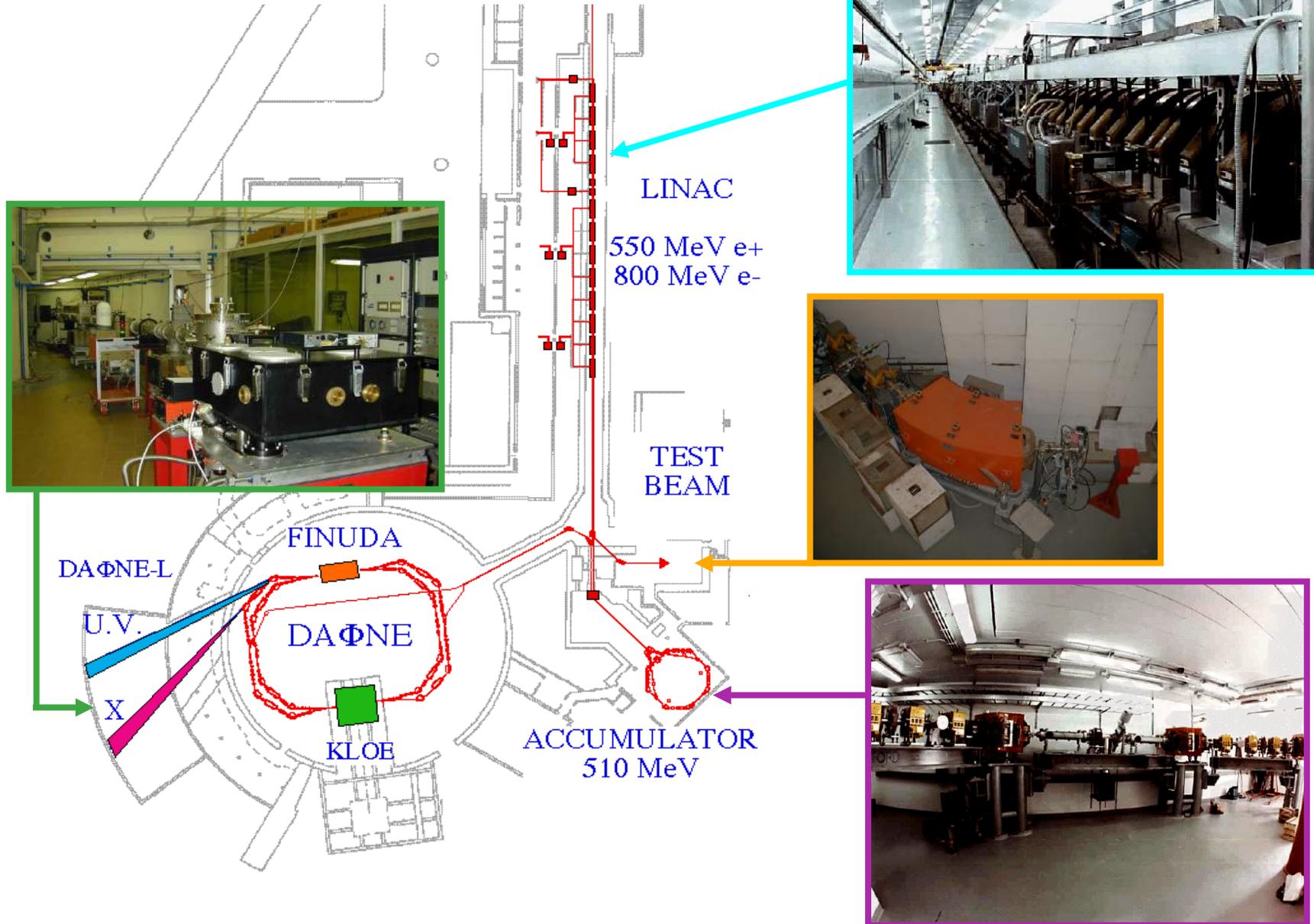


La **costruzione della nuova macchina iniziò nel 1963** e il primo elettrone fu immagazzinato nel 1967. Un LINAC di 350 MeV fu utilizzato come iniettore. La corrente massima circolante in ADONE era di **100 mA in 3 pacchetti**.

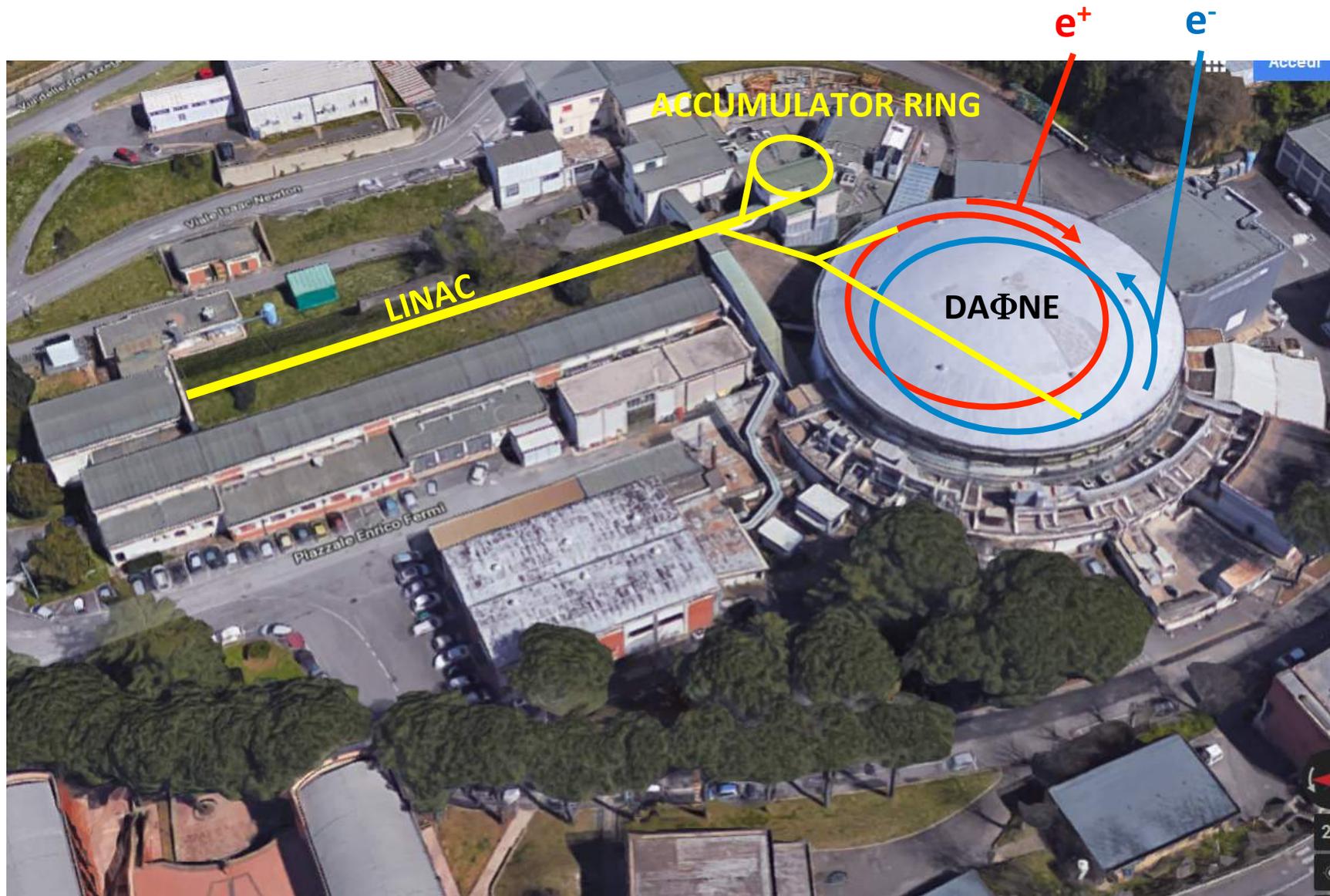
Si raggiunse la luminosità di progetto:  $3 \times 10^{29} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ .

ADONE fu spento il 26 Aprile 1993.

# La $\Phi$ -Factory a Frascati: DAΦNE



# $\Phi$ -FACTORY COMPLEX



Google image

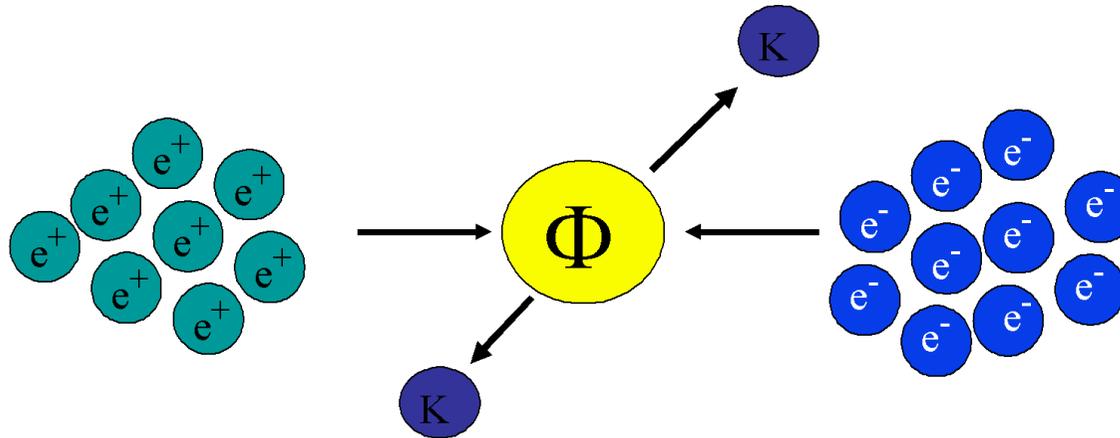
# ALCUNI PARAMETRI DI DAΦNE



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

# FISICA DELLE PARTICELLE @DAΦNE

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



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

**KLOE**  
(K LOng Experiment)

KLOE studia il rapporto tra materia e antimateria tramite i decadimenti dei Kaoni

**FINUDA**  
(Fisica Nucleare a DAΦNE)

L'esperimento FINUDA studia la *forza forte* attraverso l'inserimento di un "corpo estraneo" all'interno del *nucleo*

**Ipernucleo**

$K^- \rightarrow \Lambda \pi^-$

Ecco come appare un evento ipernucleare all'interno del rivelatore

di macchine acceleratrici - Acifrazza 11-15 Giugno 2007

**DEAR**  
(DAΦNE Exotic Atom Research)

**Idrogeno Kaonico**

Target cell  
Target-cell  
CCDs  
DEAR Beam pipe  
Kaon entrance window

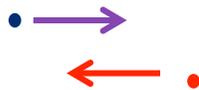
$2p \rightarrow 1s (K_{\alpha})$   
**X ray of interest**

L'esperimento DEAR studia la *forza forte* attraverso lo studio degli *atomi kaonici* (in cui un  $K^-$  ha sostituito un elettrone atomico).

# SEZIONE D'URTO E LUMINOSITÀ DI UN COLLIDER

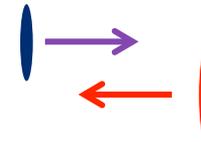
Due particelle ( $e^+/e^-$  a DAΦNE ,ad esempio) che collidono possono produrre *tipi diversi di eventi*, alcuni più probabili di altri. La *sezione d'urto*  $\sigma$  di un determinato evento è *proporzionale alla probabilità che l'evento avvenga* e si misura in  $\text{cm}^2$ .

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



**Evento poco probabile.**

A bassa sezione d'urto



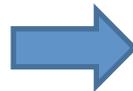
**Evento più probabile.**

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:  $10^{-28} \text{ m}^2$  ovvero  $10^{-24} \text{ cm}^2$

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

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

# LUMINOSITÀ DI UN COLLIDER

The luminosity is related to:

- the amount of colliding particles
- frequency of collision
- the beams dimensions at the interaction point

Number of particles per beam ( $\sim 10^{10}$ )

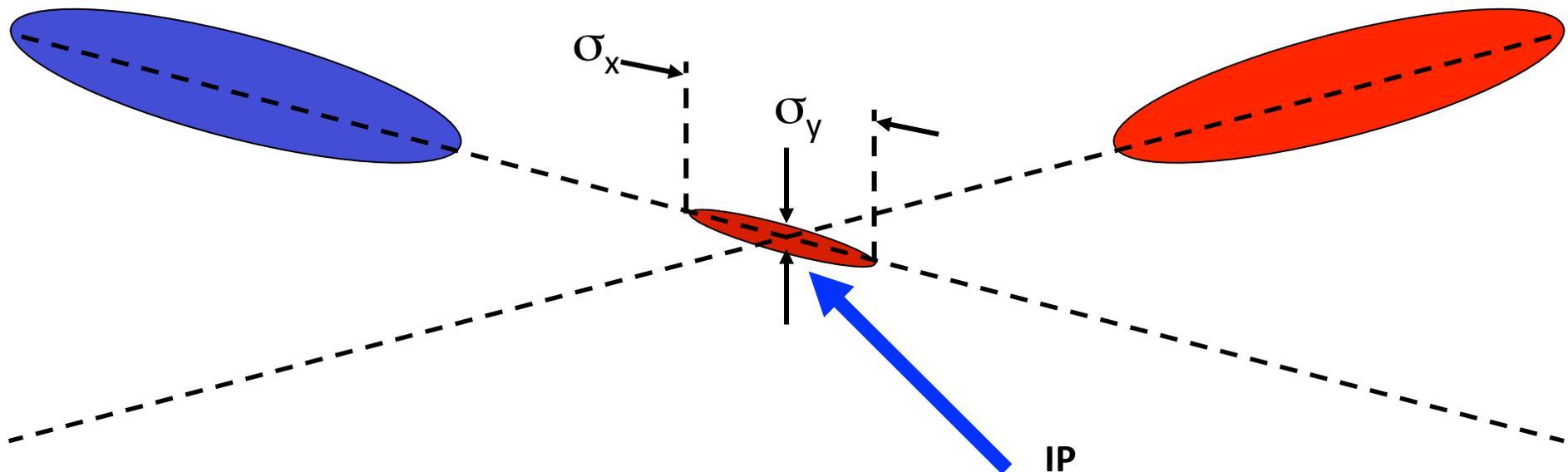
Collision frequency (up to hundreds of MHz)

For gaussian beams



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

Transverse dimensions at the Interaction point (IP): up to few  $\mu$  (or even less)

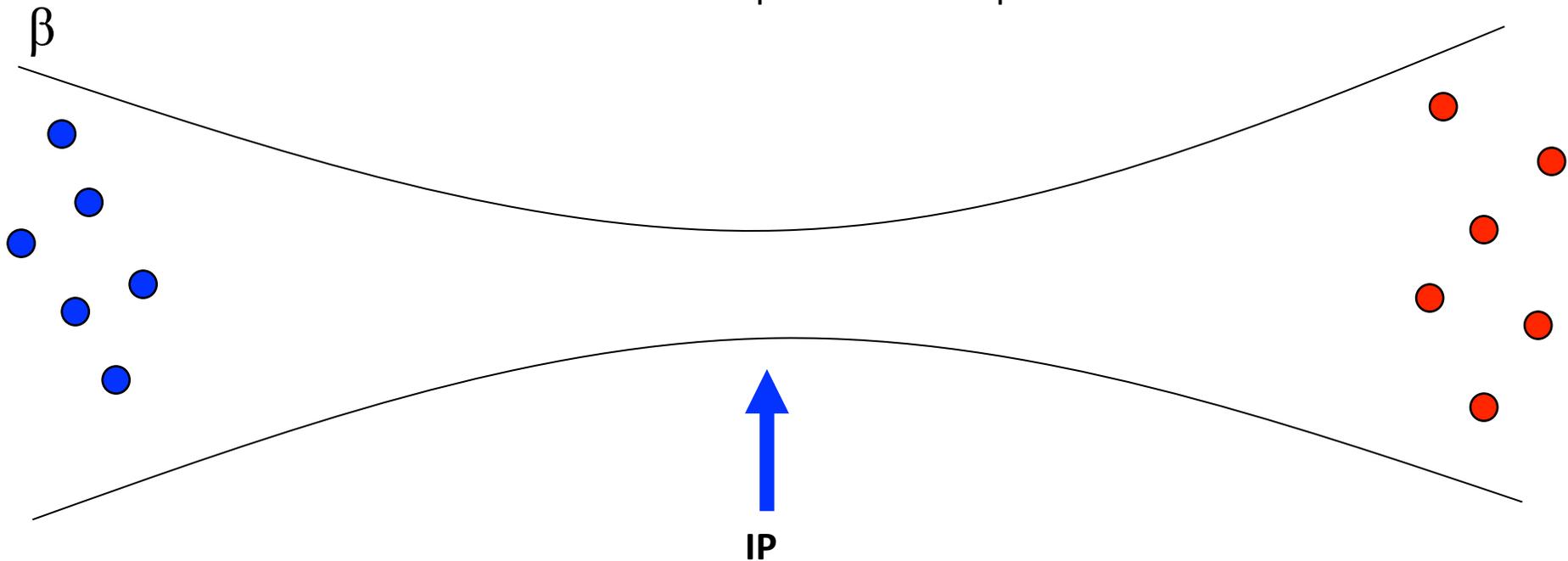


# Luminosità di un *collider*

Numero di particelle per fascio

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

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

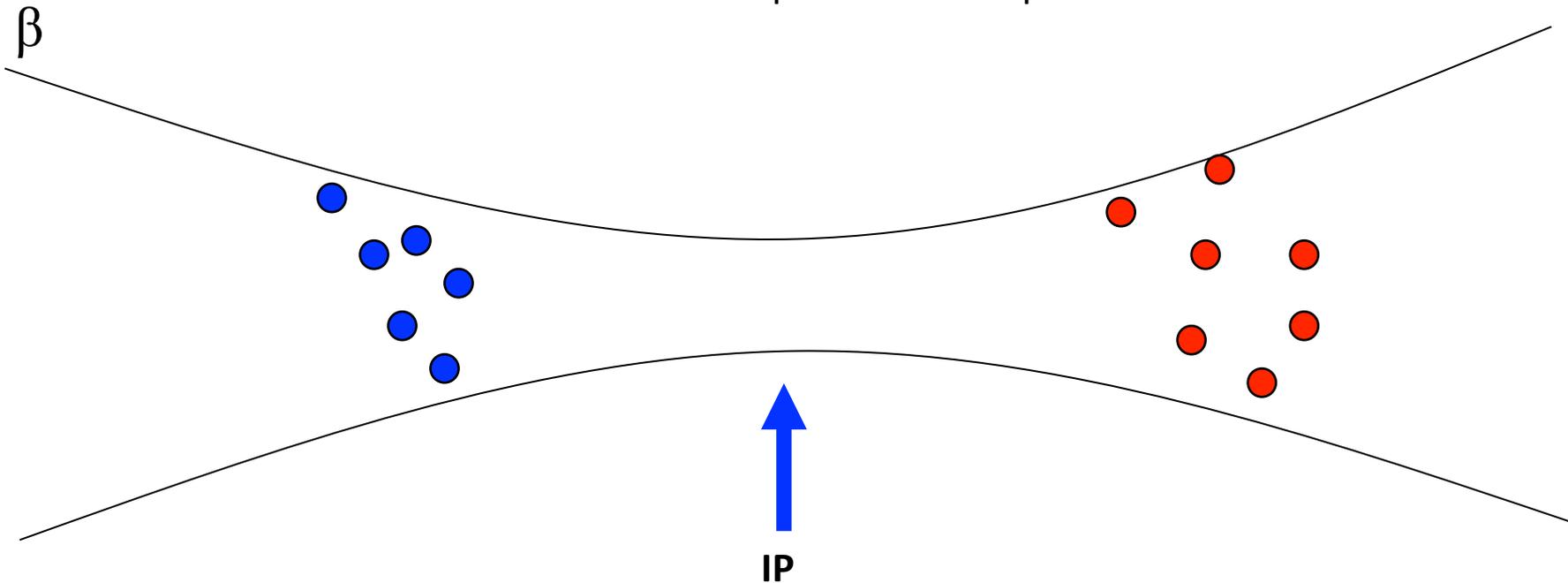


# Luminosità di un *collider*

Numero di particelle per fascio

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

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

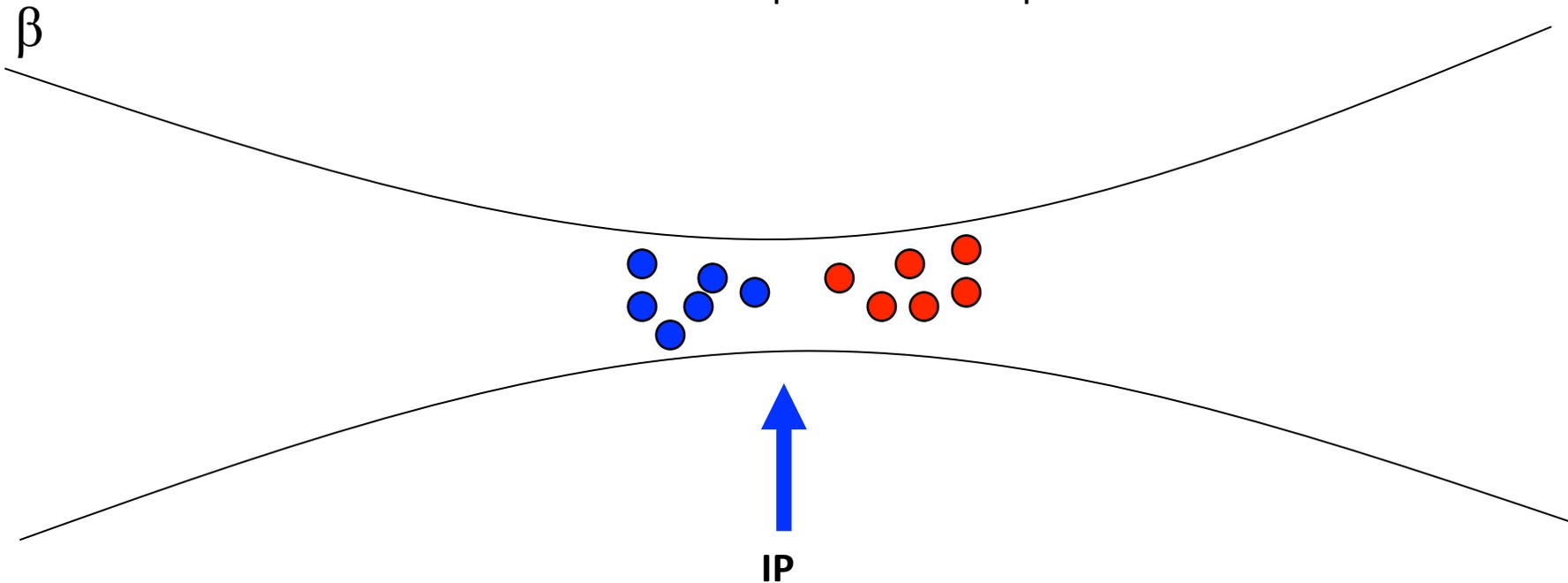


# Luminosità di un *collider*

Numero di particelle per fascio

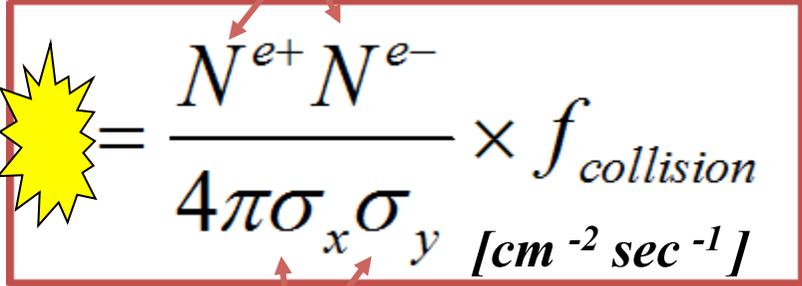
$$L = \frac{N^{e^+} N^{e^-}}{4\pi\sigma_x \sigma_y} \times f_{collision} \quad [cm^{-2} sec^{-1}]$$

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



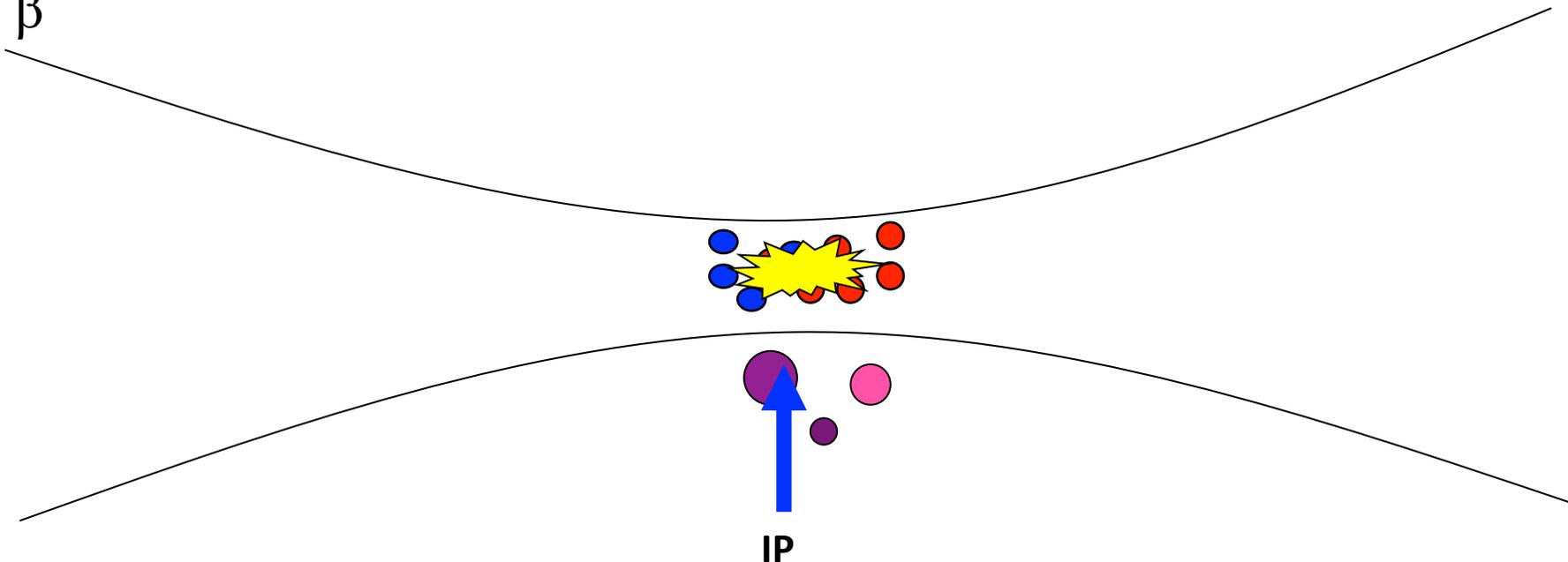
# Luminosità di un *collider*

Numero di particelle per fascio


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

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

$\beta$

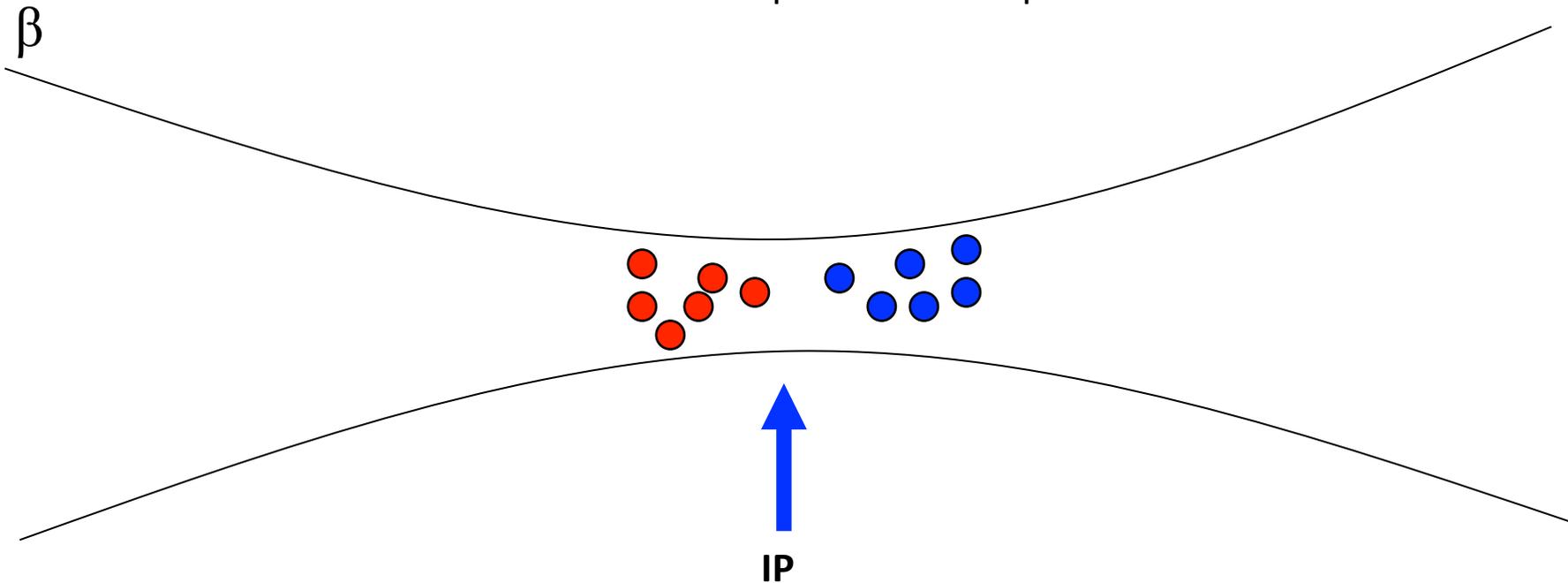


# Luminosità di un *collider*

Numero di particelle per fascio

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

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

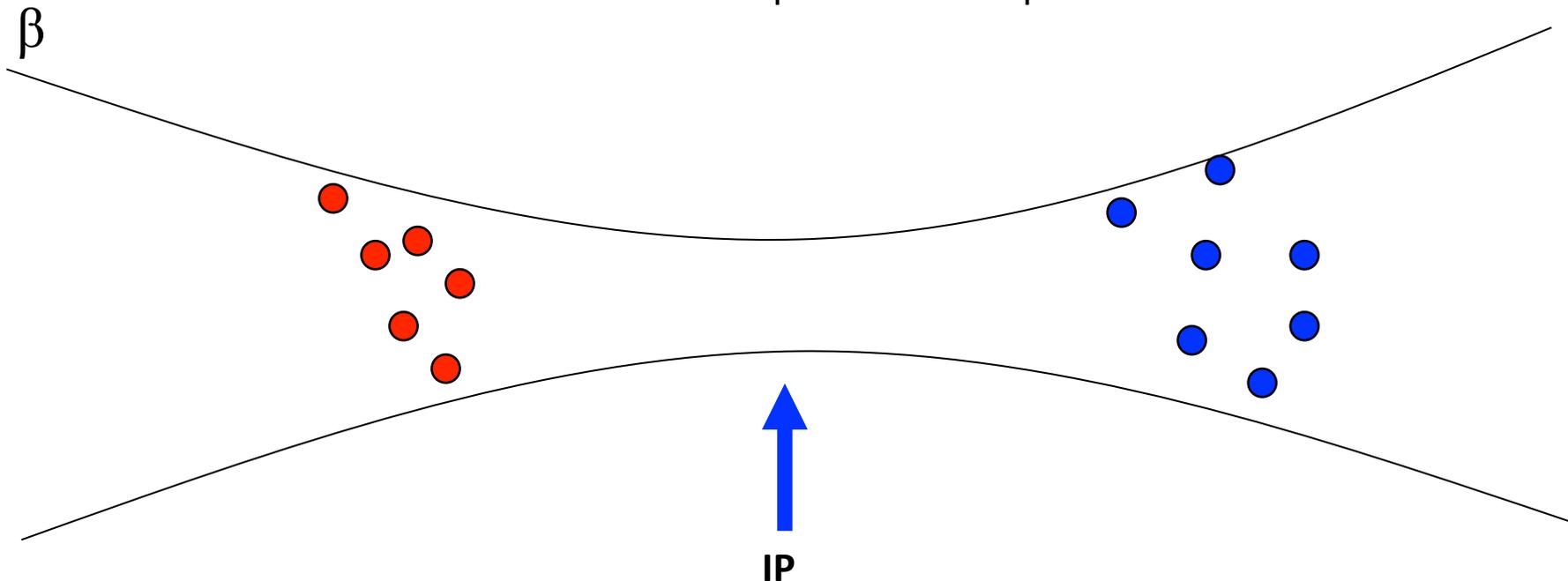


# Luminosità di un *collider*

Numero di particelle per fascio

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

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

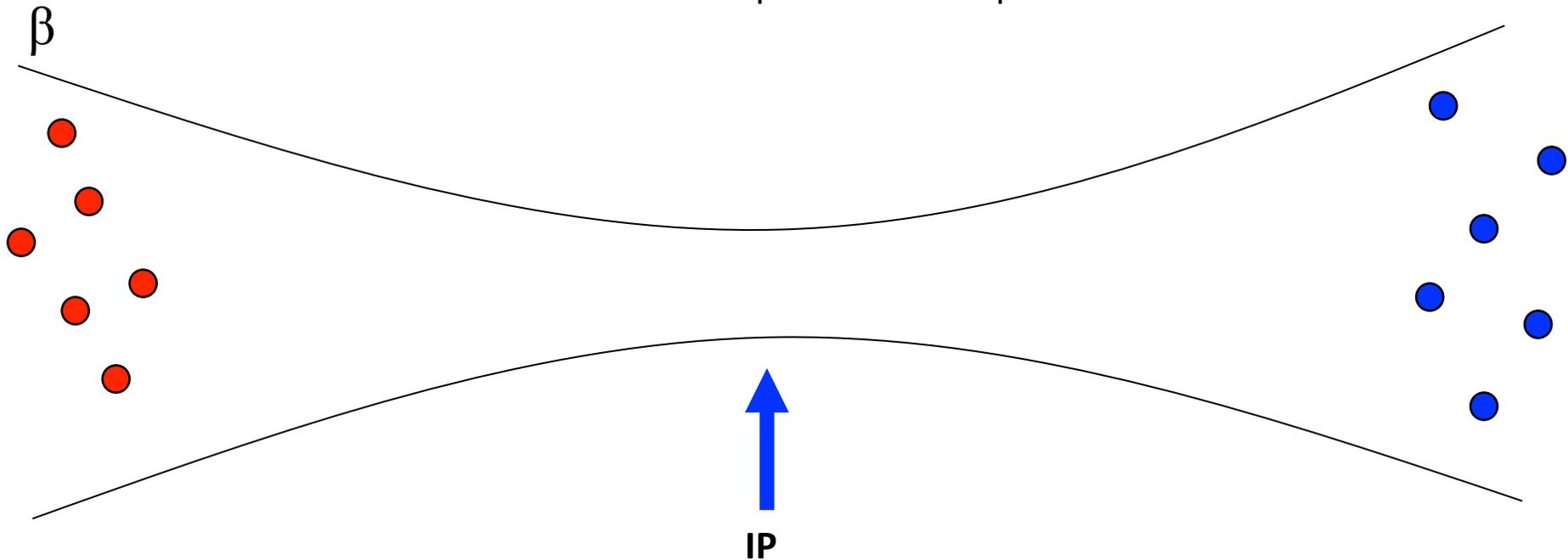


# Luminosità di un *collider*

Numero di particelle per fascio

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

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



# LUMINOSITÀ DI UN COLLIDER: ESEMPIO CALCOLO PER DAΦNE

Produzione di  $\Phi$  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  $\sigma_x$ )

10  $\mu\text{m}$  (pointing to  $\sigma_y$ )

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



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

# LEP (Large Electron Positron) CERN 1988-2001

## LEP1

1300•10<sup>6</sup> CHF costo dell'acceleratore e delle relative infrastrutture  
1989 prime collisioni E = 46 GeV energia dello Z<sup>0</sup>

## 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

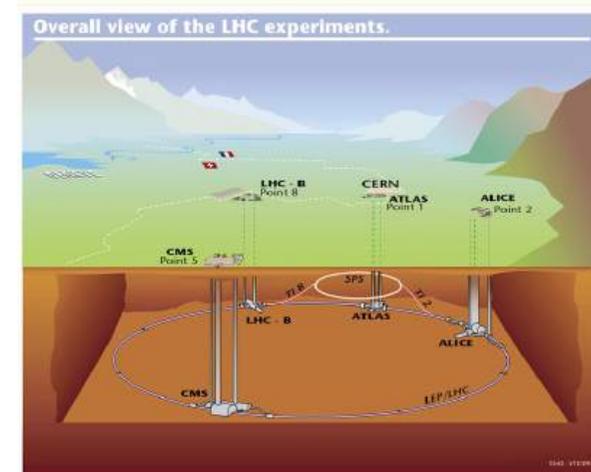
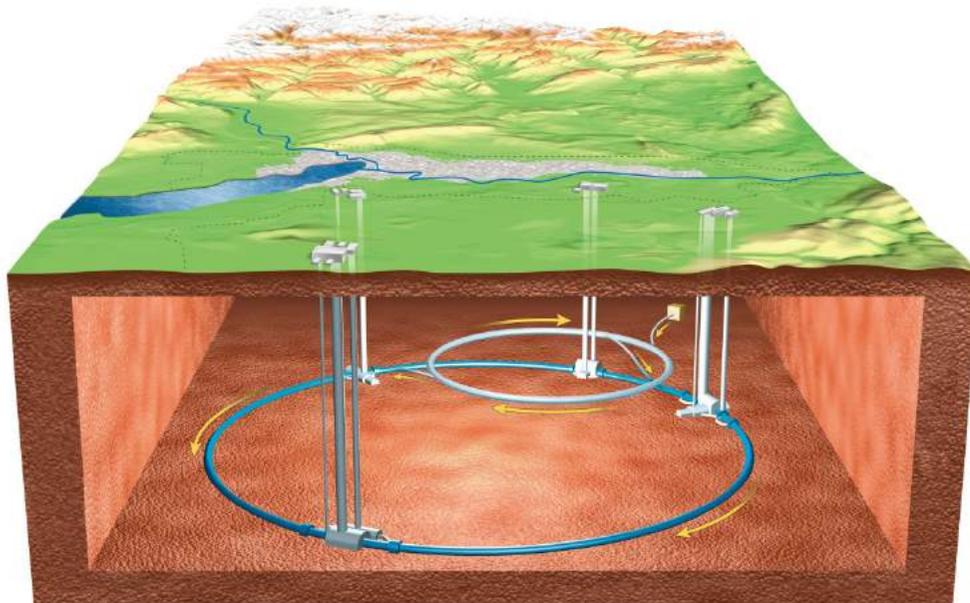
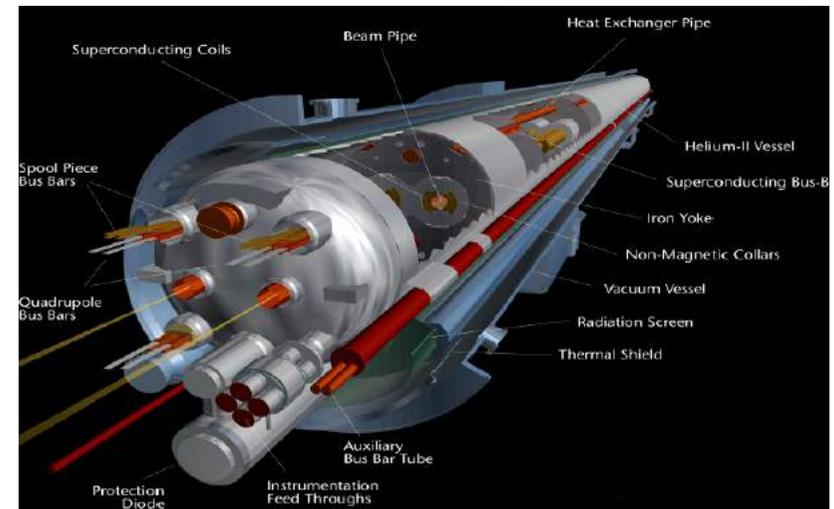
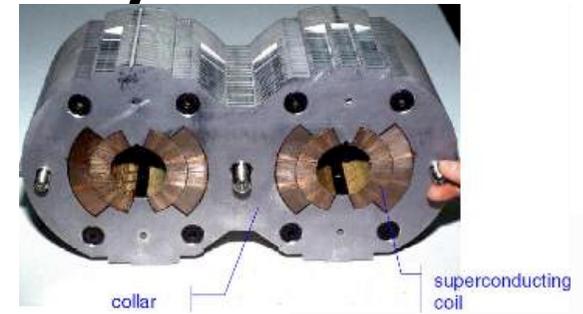


# LHC (LARGE HADRON COLLIDER) CERN

## LHC main parameters

Colliding particles proton-proton but also ions (Pb-Pb)

Max Energy per beam	7 TeV
Number of bunches	2808
Crossing angle	300 $\mu$ rad
Emittance	$5 \times 10^{-10}$ m
IP transv. Dim. ( $\sigma_x = \sigma_y$ )	16 $\mu$ m
Machine length	27.8 Km
$B_{MAX}$ dipoles	$\sim 8$ T with $I = 11700$ A @ $T = 1.9$ K
L	$\sim 10^{34}$ $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$



# LHC TUNNEL

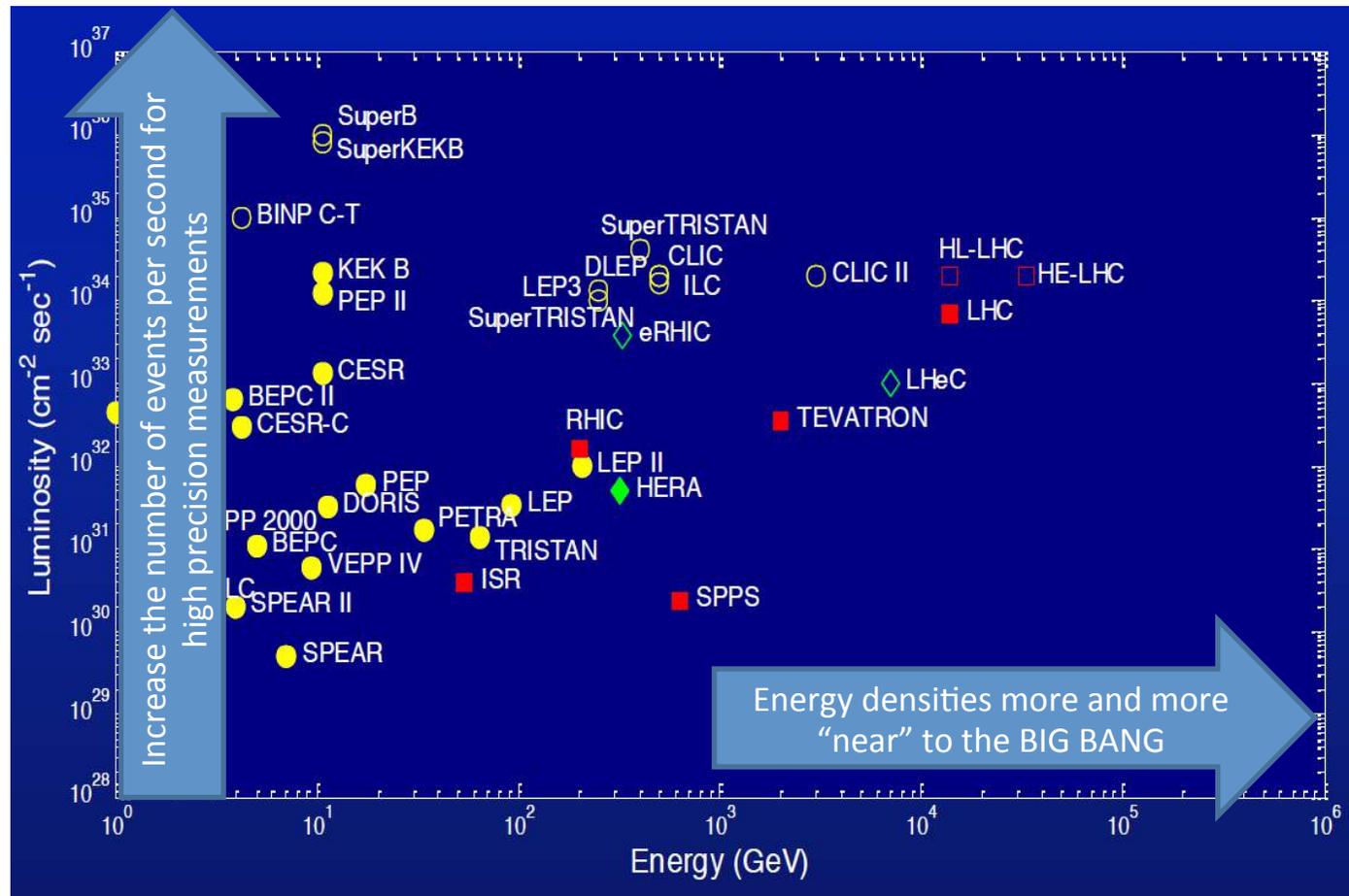


# ENERGY AND LUMINOSITY: COLLIDER DEVELOPMENT

The development of colliders followed two different directions:

-**higher and higher energies** (discovering machines, LHC,...)

-**higher and higher luminosities** (to increase the number of events and to perform precise measurements)



# LINEE DI RICERCA PRINCIPALI SUGLI ACCELERATORI DI PARTICELLE

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

**ALTI GRADIENTI  
ACCELERANTI**

**ALTA ENERGIA**

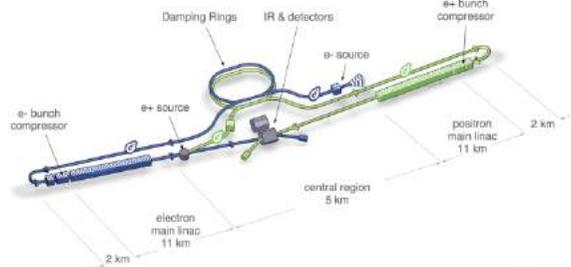
**ELEVATA QUALITA' DI  
FASCIO**

**INTENSITA' DEI FASCI  
DI PARTICELLE**

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



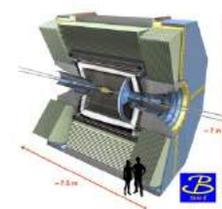
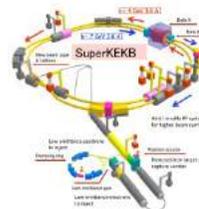
**Collider ad alta energia compatti per fisica fondamentale (es. linear collider)**



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



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



# IL LIMITE DELLE MACCHINE CIRCOLARI AD ALTA

## ENERGIA

Macchine  
adroniche (p,...)

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

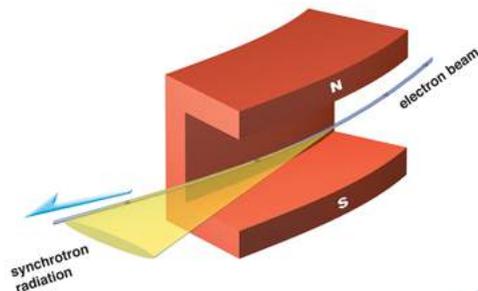


I massimi campi magnetici ottenibili con dipoli superconduttori sono dell'ordine di 15-20 T (8 T LHC)

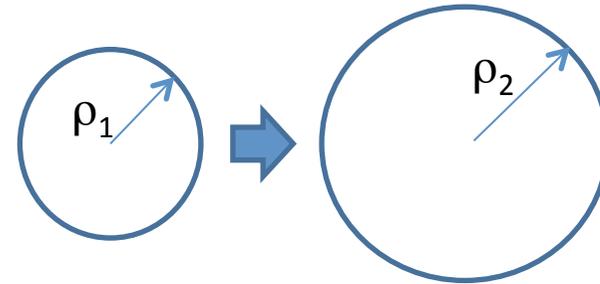
Macchine  
leptoniche  
(elettroni)

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

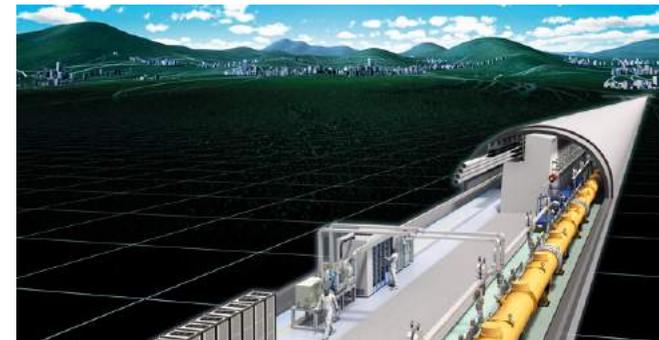
Il limite ancor più che sul raggio di curvatura massimo è dato dalla potenza persa per emissione di luce di sincrotrone



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.



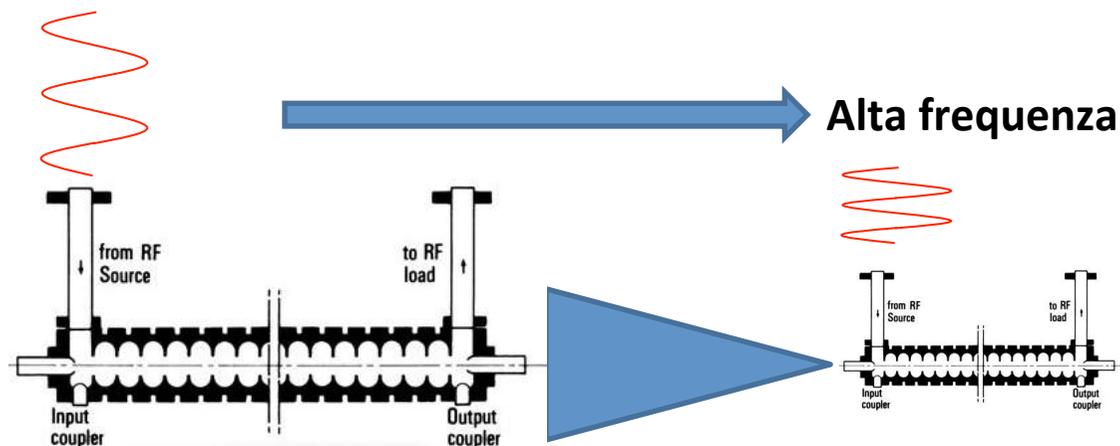
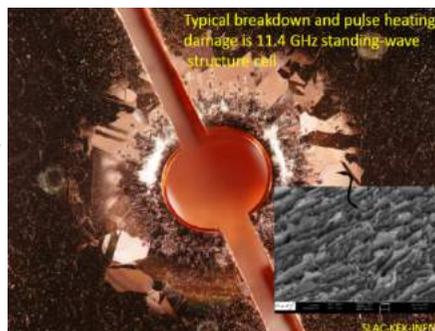
## Alte frequenze di alimentazione

...Compatibilmente con:

-Disponibilità sorgenti elettromagnetiche

-Dissipazioni sulle strutture (potenze richieste)

-Limiti di scarica (breakdown)



## STRUTTURE METALLICHE



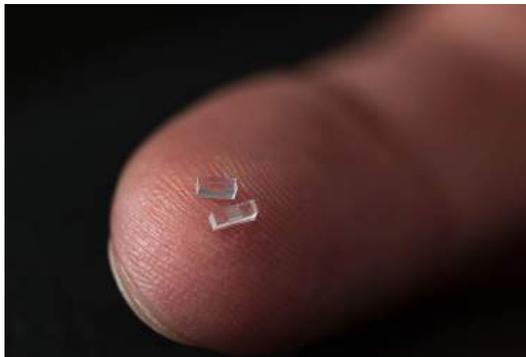
Strutture ad alto gradiente possono raggiungere  **$\sim 100-150$  MV/m** di campo accelerante con numero di scariche limitato.

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

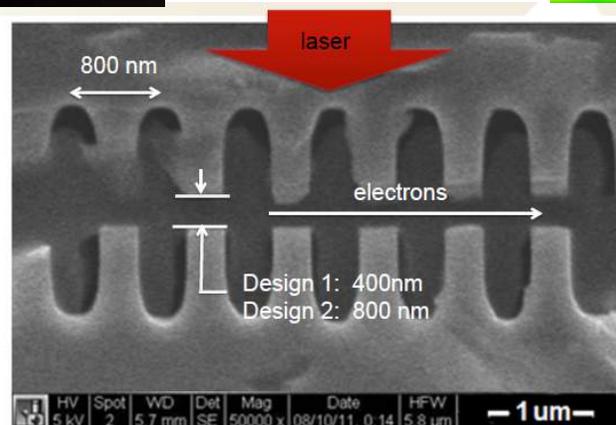
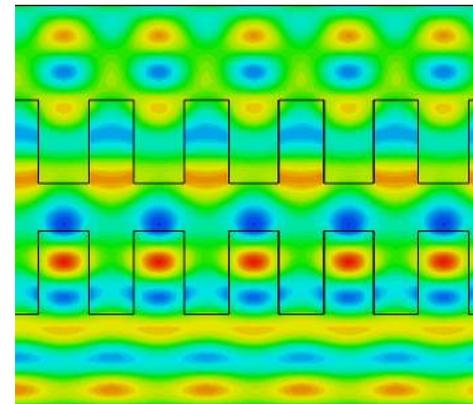
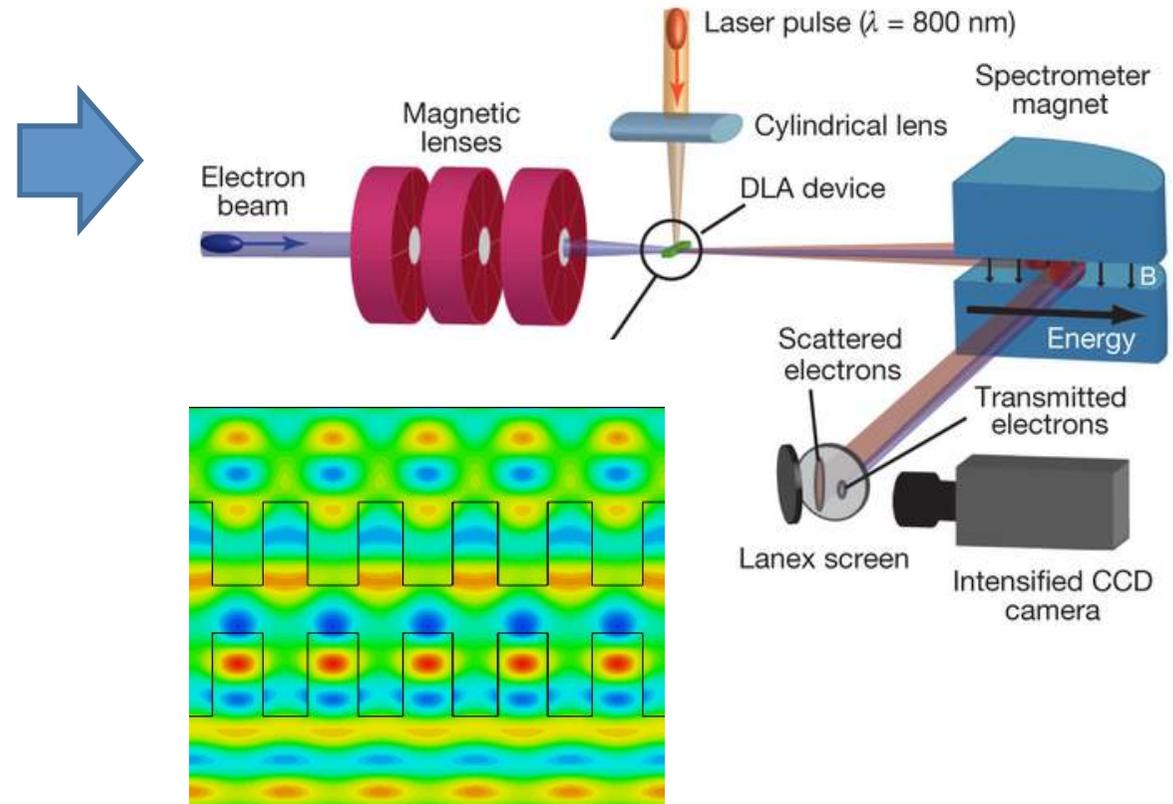
# STRUTTURE DIELETTRICHE ALIMENTATE DA LASER (DLA)

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



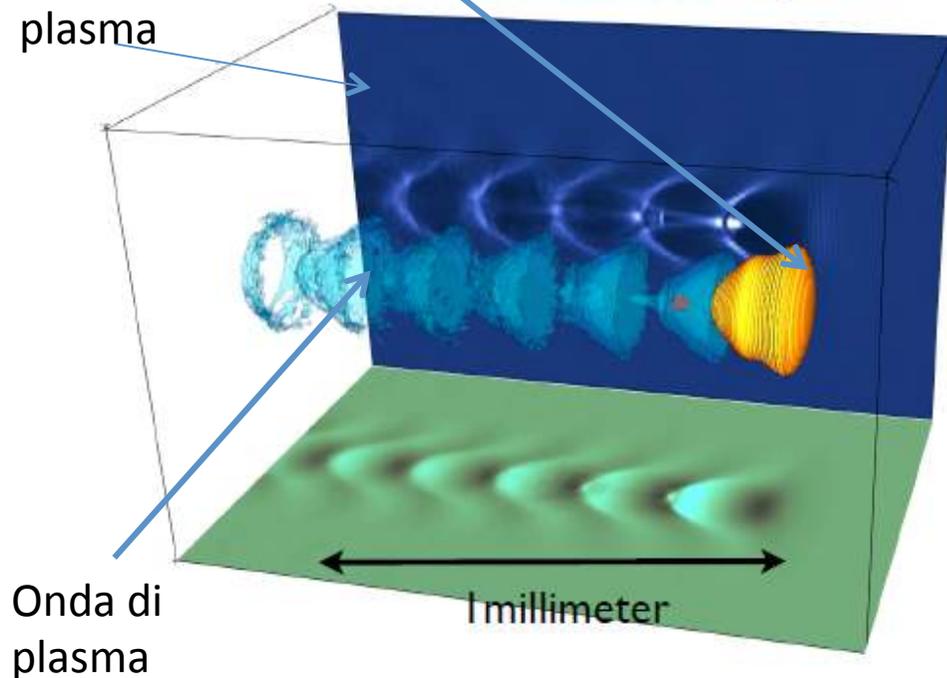
1 meter

Campo elettrico  $< 100$  MV/m

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

Impulso laser o pacchetto di elettroni che genera l'onda di plasma

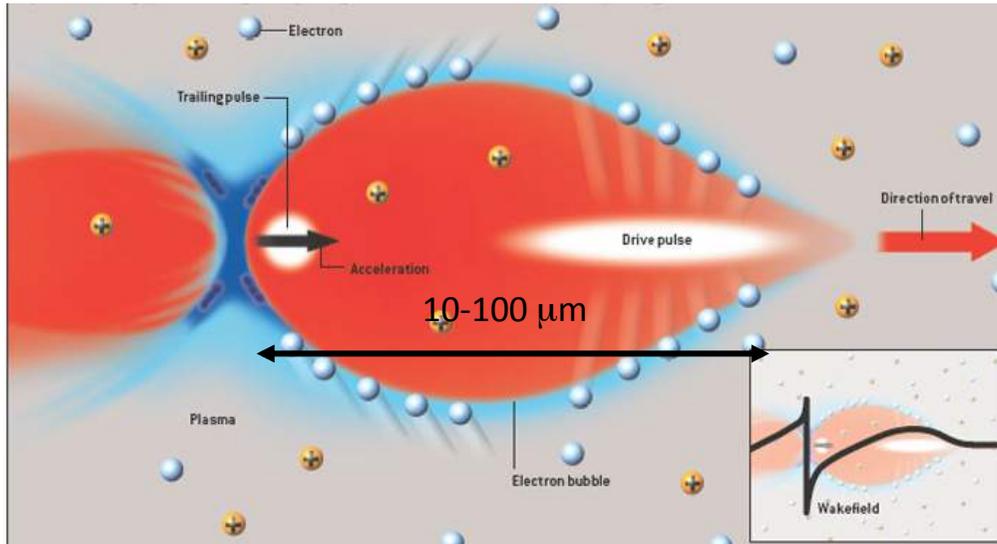
Plasma Cavity



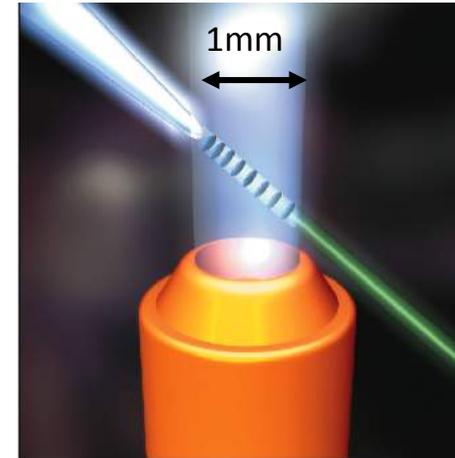
Negli acceleratori al plasma, un'onda di plasma viene generata da un *impulso laser* (o da un *pacchetto di elettroni*) che attraversa il plasma stesso. Nell'onda di plasma si possono raggiungere campi superiori ai 100 GV/m

km  m

# ACCELERAZIONE LASER-PLASMA (LWFA)



laser Gas jet



Electroni accelerati

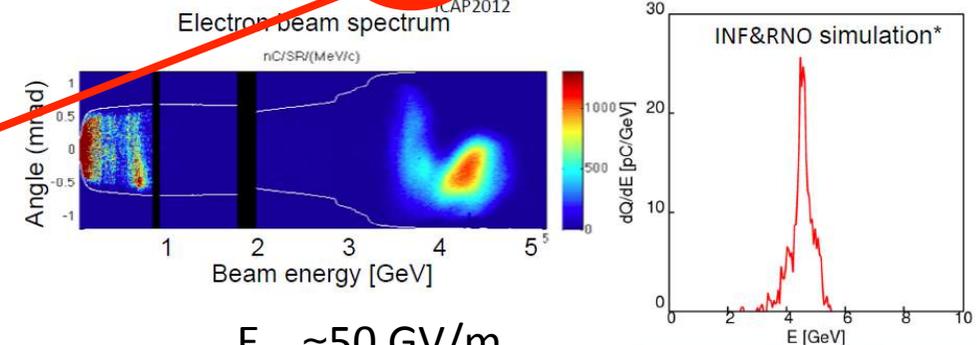
$$E_0 = \frac{m_e c \omega_p}{e} \approx 100 \left[ \frac{\text{GeV}}{m} \right] \cdot \sqrt{n_0 [10^{18} \text{ cm}^{-3}]}$$

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 CAP2012



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

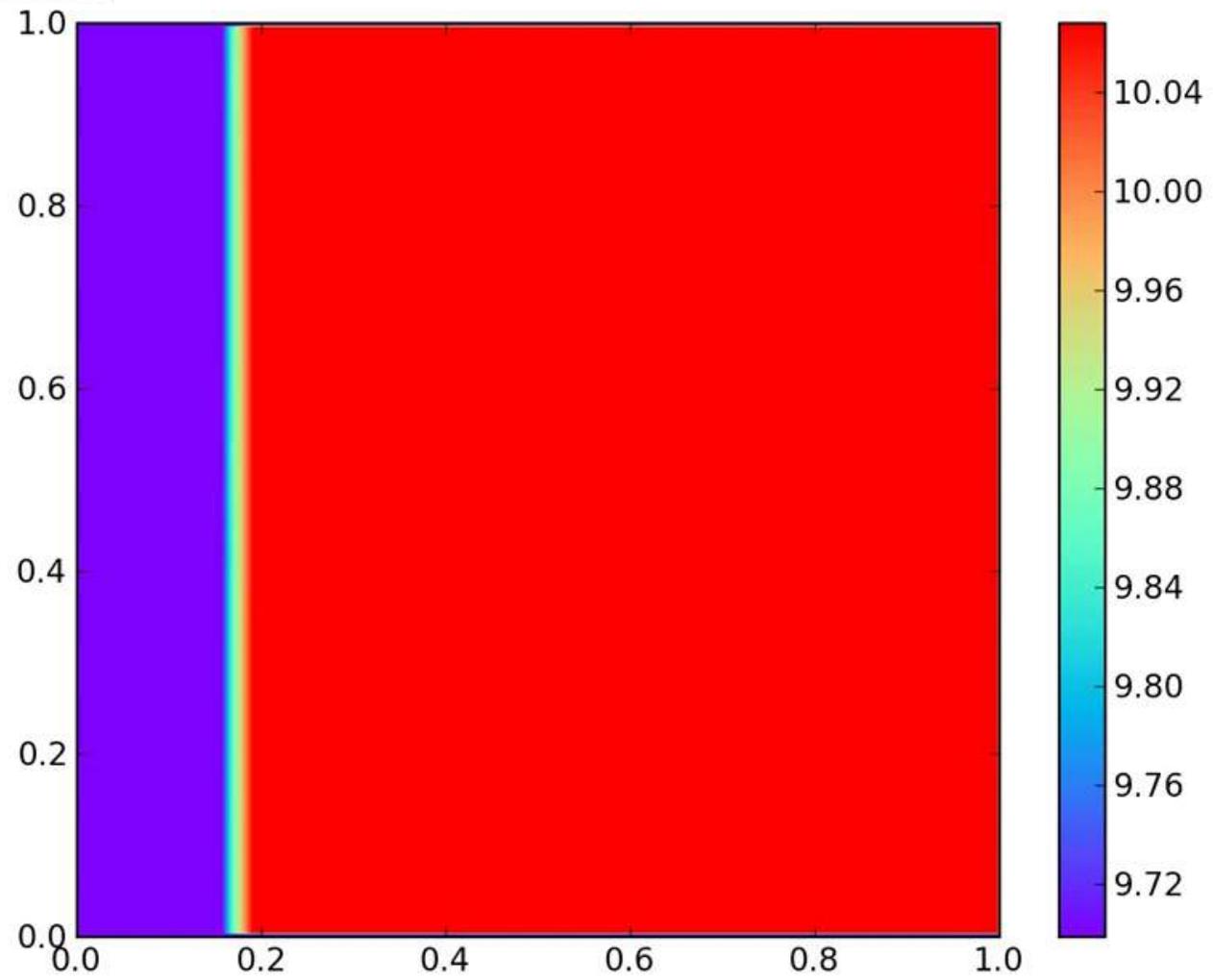


$$E_{\text{acc}} \cong 50 \text{ GV/m}$$

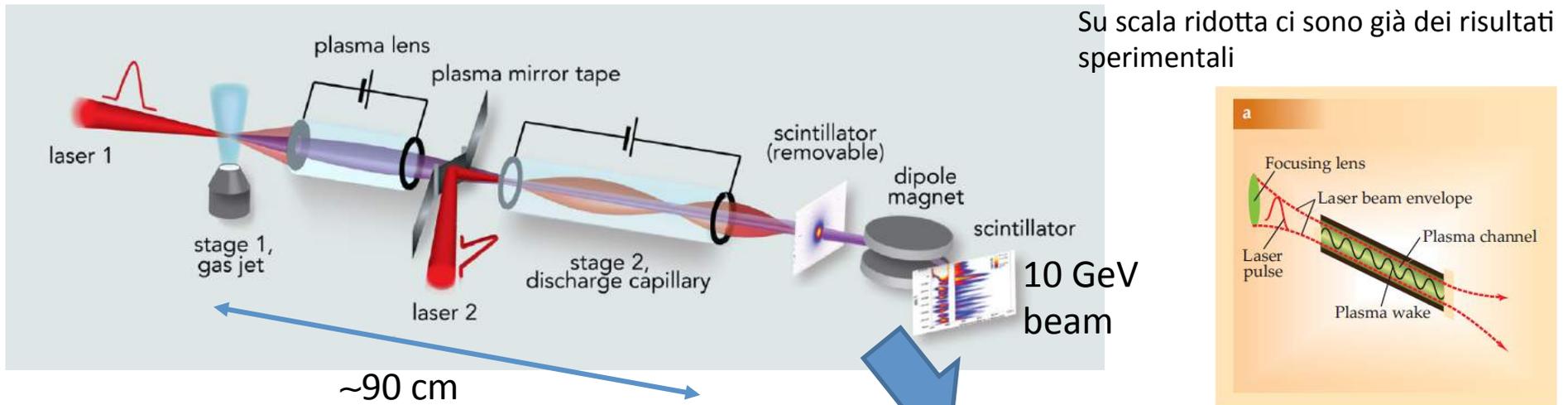
- **Laser** (E=15 J):
  - Measured) longitudinal profile ( $T_0 = 40 \text{ fs}$ )
  - Measured far field mode ( $w_0 = 53 \mu\text{m}$ )
- **Plasma**: parabolic plasma channel (length 9 cm,  $n_0 \sim 6\text{-}7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ )

W.P. Leemans et al., PRL 2014

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

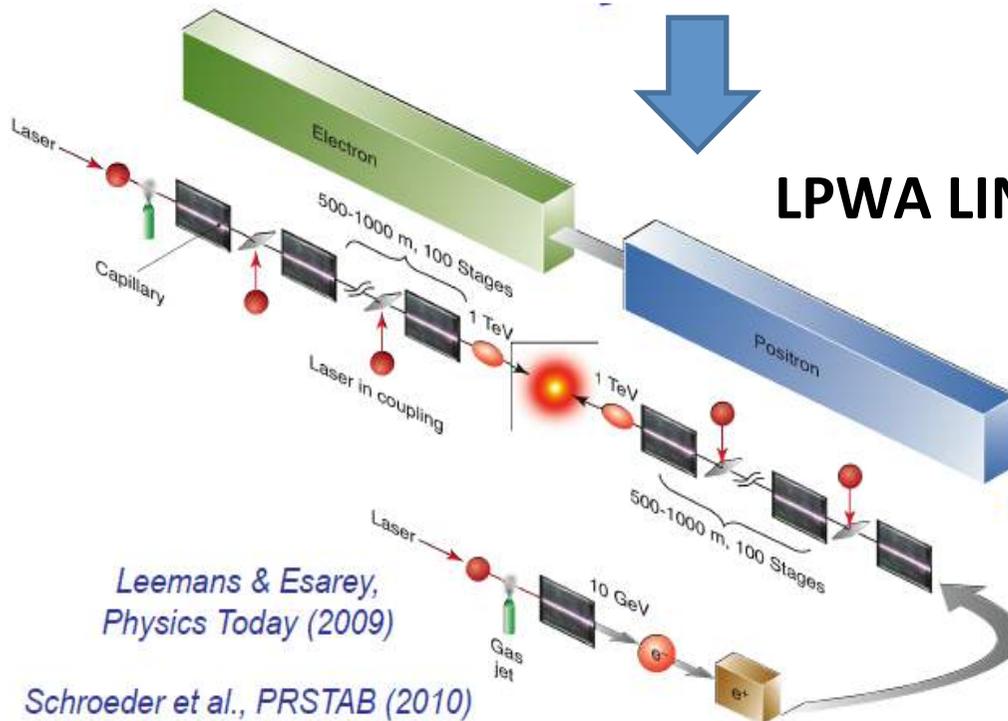


# ACCELERAZIONE LASER-PLASMA: MULTI-GeV LINAC



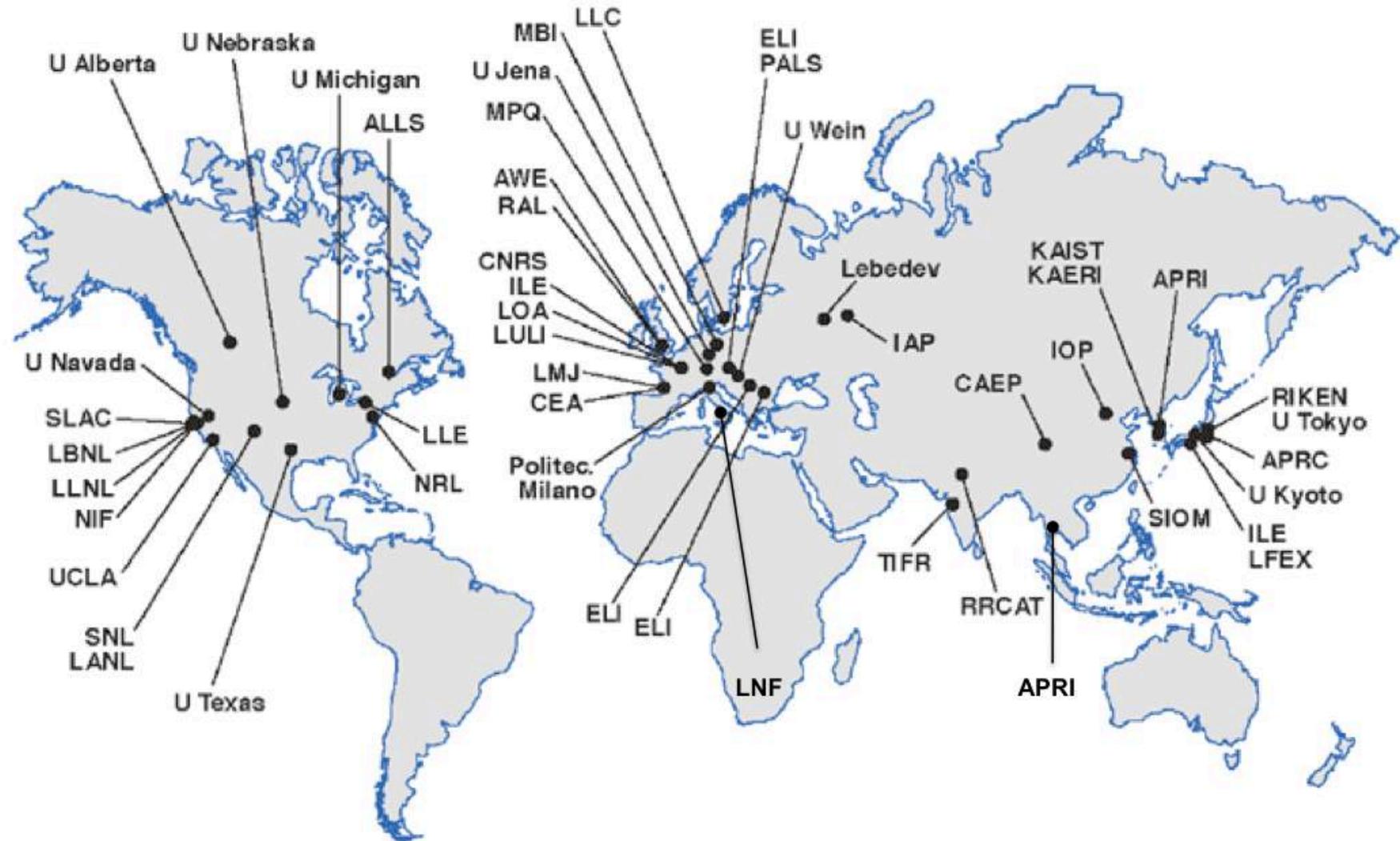
**SORGENTI DI RADIAZIONE COMPATTE BASATE SU LPWA**

**LPWA LINEAR COLLIDER?**



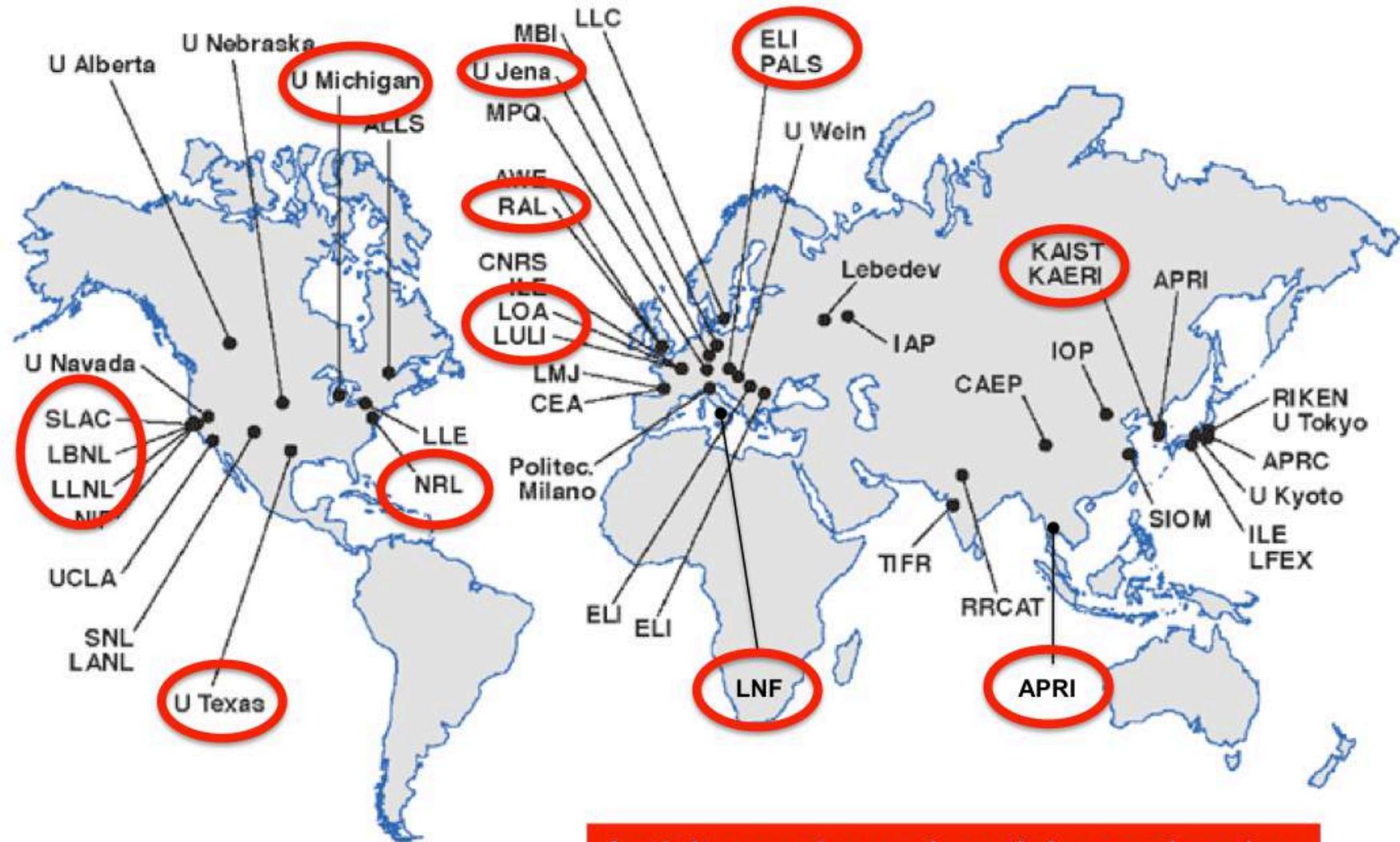
- LPA-linear collider:
- 50 stages (1 TeV collider)
- 10 GeV/stage
- requires ~10 J laser (at tens of kHz, hundreds of kW)
- $n=10^{17} \text{ cm}^{-3}$  (set by laser depletion)

# ULTRA-HIGH INTENSITY LASER FACILITIES



<http://www.icuil.org/>

# ULTRA-HIGH INTENSITY LASER FACILITIES



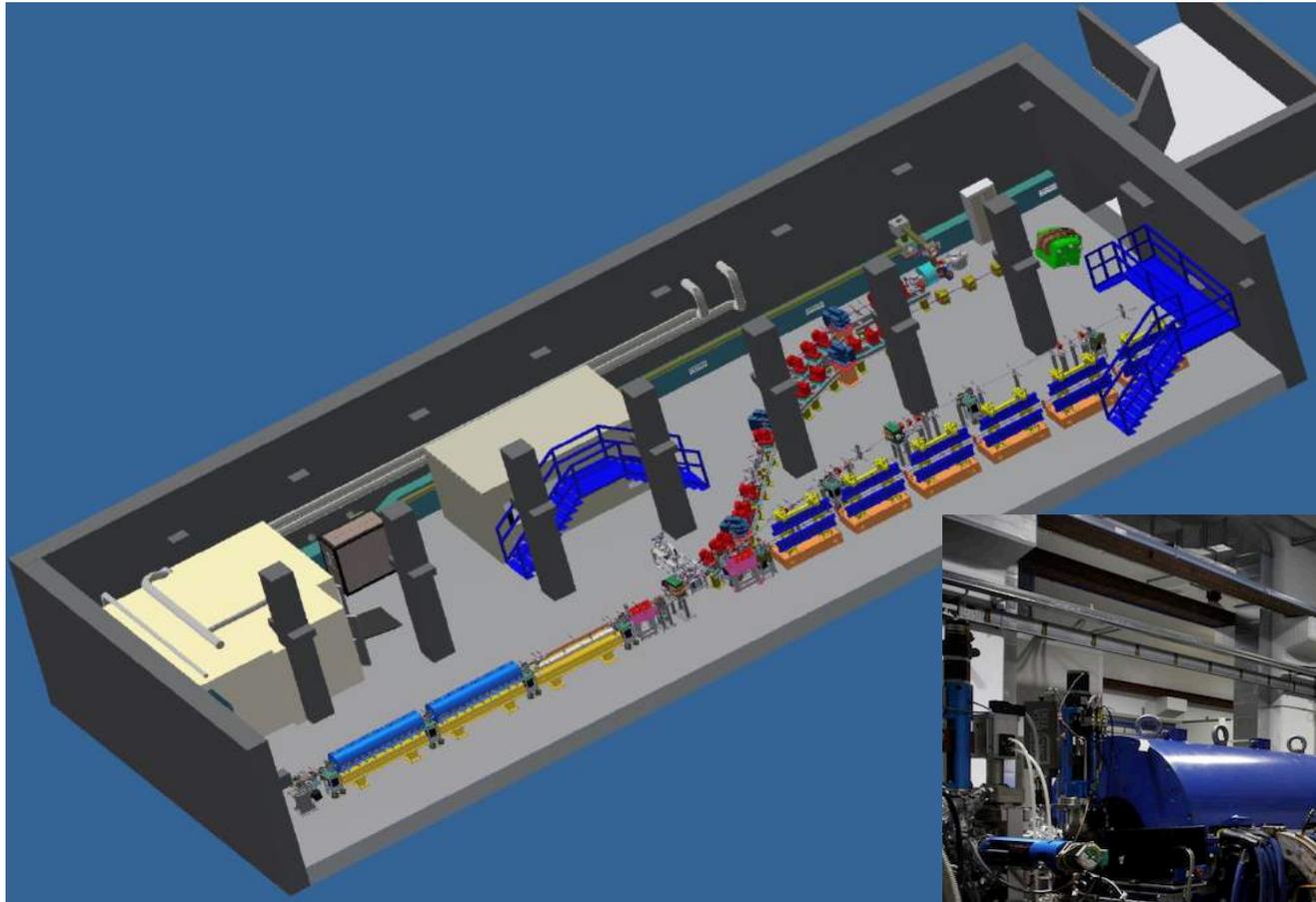
<http://www.icuil.org/>

Activity on charged particle acceleration

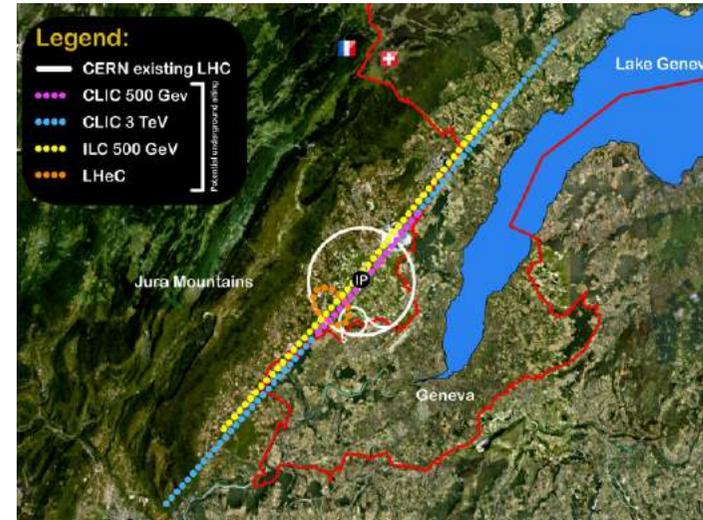
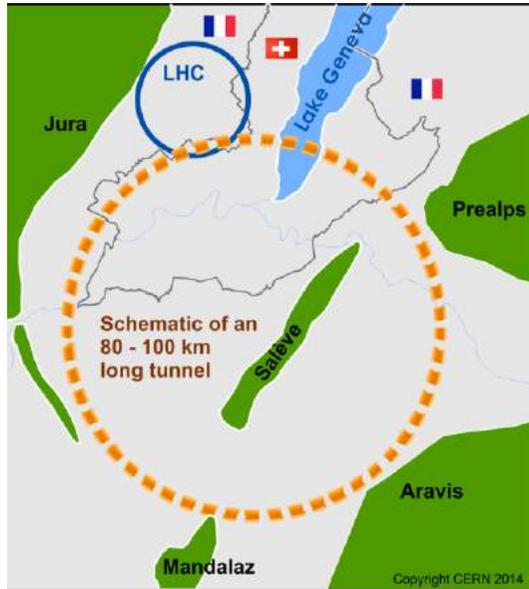
# SPARC\_LAB @LNF

*(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.

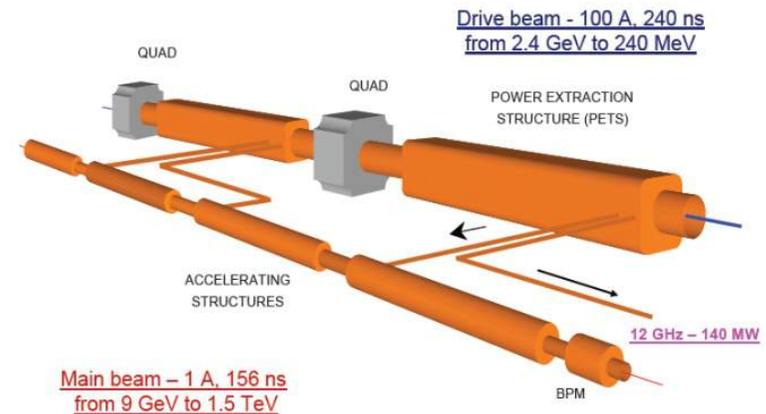


# PROPOSTE DI FUTURI COLLIDER AL CERN DOPO LHC



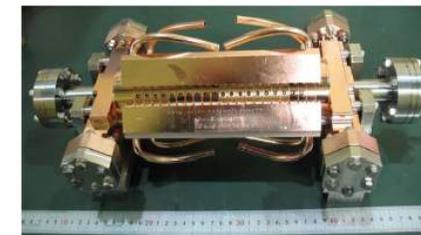
## FCC hadron collider parameters

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)	1.1	2.2
bunch spacing [ns]	25	25 (5)	25	25
luminosity/lp [ $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ]	5	~25	1	5
events/bunch crossing	170	~850 (170)	400	27
stored energy/beam [GJ]	8.4	6.6	0.36	0.7
synchrotron radiation [W/m/aperture]	30	58	0.2	0.35



Main beam – 1 A, 156 ns  
from 9 GeV to 1.5 TeV

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



# 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

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

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

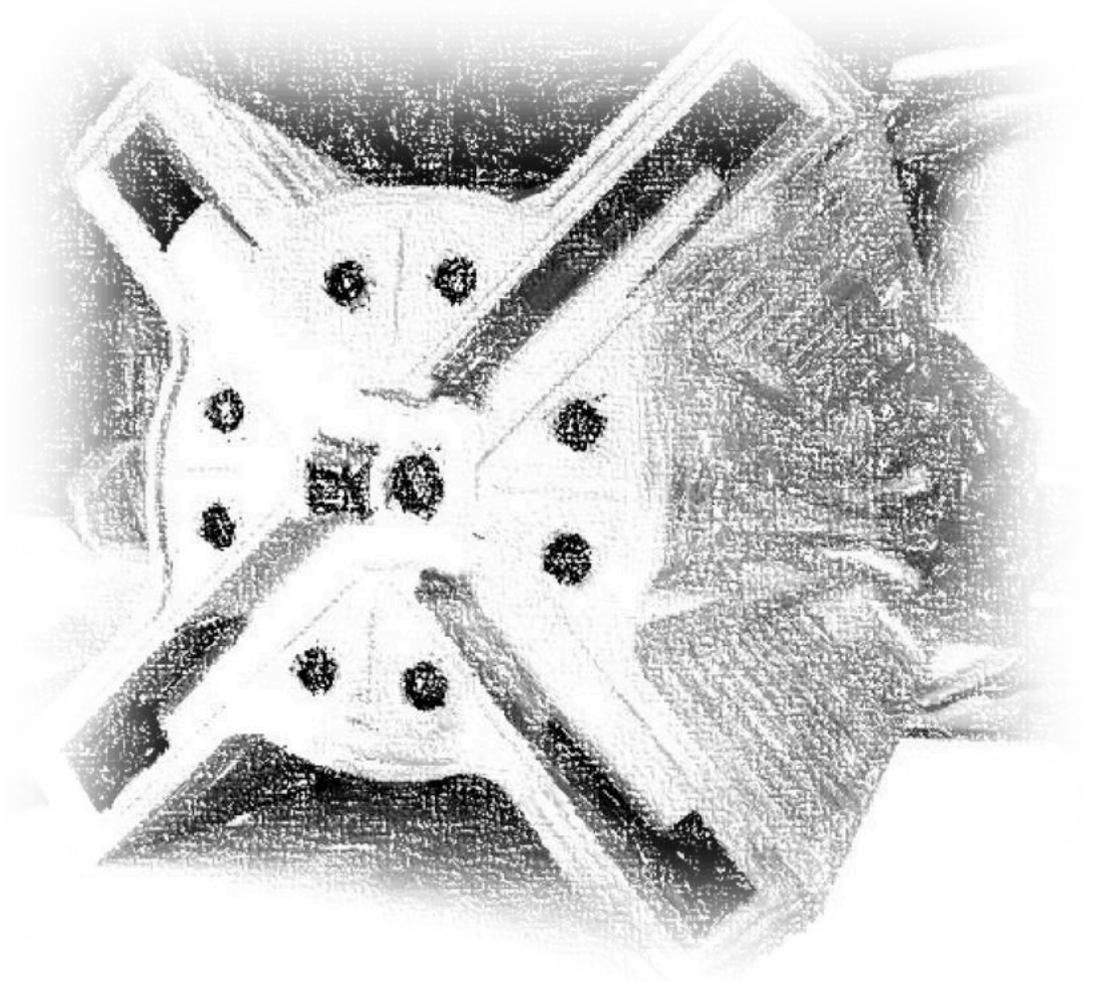
⇒L' R&D NELLA FISICA E TECNOLOGIA DEGLI ACCELERATORI DI PARTICELLE RIMANE UNO DEI SETTORI PIU' **ENTUSIASMANTI DELLA RICERCA** IN FISICA APPLICATA IN CUI **FANTASIA E CREATIVITA'** SONO GLI INGREDIENTI FONDAMENTALI

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

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

Quali i **possibili scenari** futuri?

**UN SENTITO GRAZIE PER LA VOSTRA ATTENZIONE!!!!**



**Ringrazio...**

M. E. Biagini, M. Boscolo, A. Cianchi, M. Ferrario, A. Gallo, A. Ghigo, S. Guiducci, C. Milardi, A. Mostacci, A. Balerna

# 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>