

# Gli acceleratori di particelle

*David Alesini*

*Divisione Acceleratori*

*LNF-INFN*

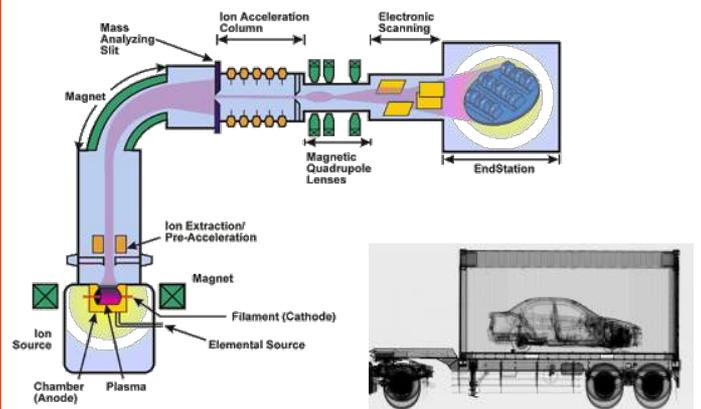


# A cosa serve un acceleratore di particelle

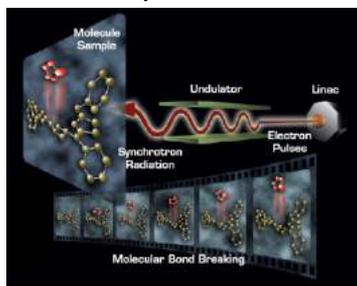
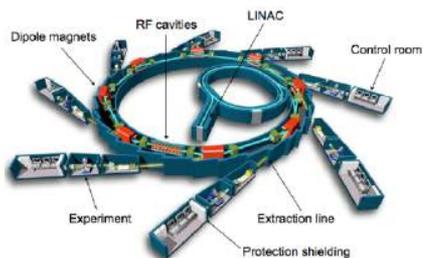
**Fisica nucleare e subnucleare:** LHC, Dafne,...



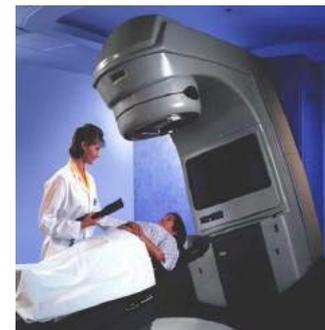
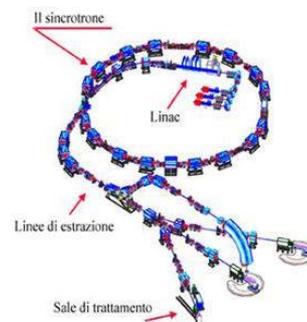
**Applicazioni industriali:** impiantazione ionica, sterilizzazione materiali,...



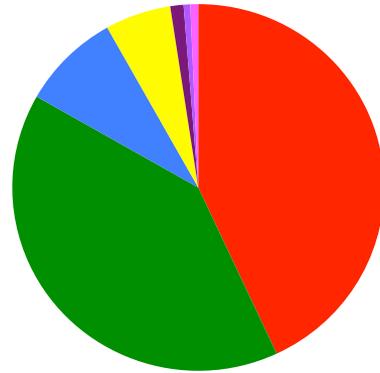
**Fisica della materia:** come sorgenti di radiazione per lo studio della struttura della materia e della dinamica delle reazioni chimiche (sincrotroni, FEL, sorgenti neutroniche; LCLS, SPARC,...)



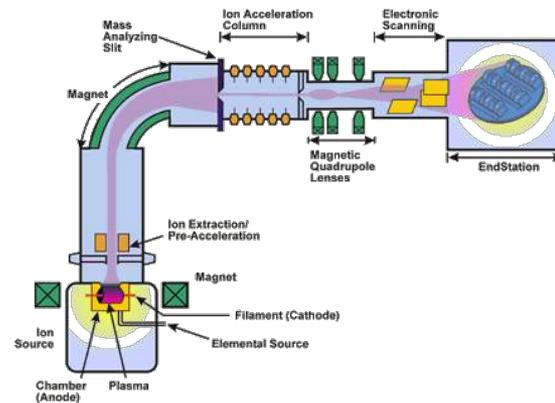
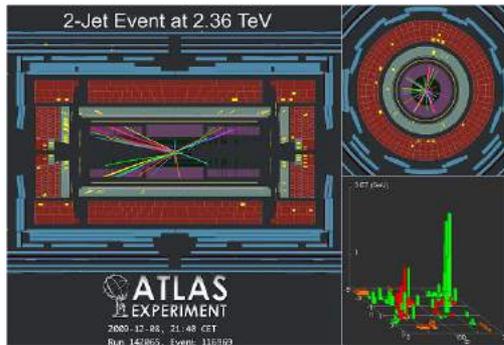
**Applicazioni mediche** per la cura dei tumori (radioterapia, adroterapia, CNAO, Pavia) e per la produzione di isotopi



# ACCELERATORI DI PARTICELLE: STRUMENTI PER LA FISICA, LA MEDICINA, L'INDUSTRIA,...



- Radiotherapy accelerators
- Ion implanters, surface & bulk modification
- Industrial processing and research
- Low energy accelerators for research
- Medical radioisotope production
- Synchrotron light sources
- High energy accelerators for research ( $E > 1 \text{ GeV}$ )

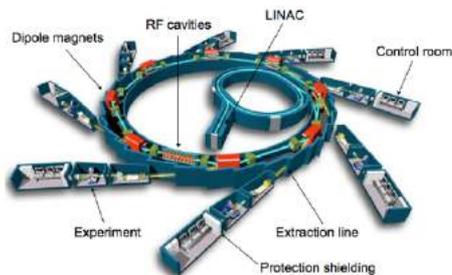


## Industrial Market for Accelerators

The development of state of the art accelerators for HEP has lead to :  
research in other field of science (light source, spallation neutron sources...)  
industrial accelerators (cancer therapy, ion implant., electron cutting&welding...)

Application	Total systems (2007) approx.	System sold/yr	Sales/yr (M\$)	System price (M\$)
Cancer Therapy	9100	500	1800	2.0 - 5.0
Ion Implantation	9500	500	1400	1.5 - 2.5
Electron cutting and welding	4500	100	150	0.5 - 2.5
Electron beam and X rays irradiators	2000	75	130	0.2 - 8.0
Radio-isotope production (incl. PET)	550	50	70	1.0 - 30
Non destructive testing (incl. Security)	650	100	70	0.3 - 2.0
Ion beam analysis (incl. AMS)	200	25	30	0.4 - 1.5
Neutron generators (incl. sealed tubes)	1000	50	30	0.1 - 3.0
<b>Total</b>	<b>27500</b>	<b>1400</b>	<b>3680</b>	

Total accelerators sales increasing more than 10% per year



# Cosa è un acceleratore di particelle



-Un acceleratore di particelle può essere considerato come un **dispositivo che trasferisce energia a particelle cariche** ( $e^-$ ,  $p$ , ..) attraverso campi elettromagnetici.

-Le particelle sono iniettate ad una certa energia iniziale  $E_i$  e raggiungono una energia finale  $E_f$  alla fine dell'acceleratore.

-In realtà con il termine acceleratore di particelle si identificano anche i cosiddetti **anelli di accumulazione** (storage rings) che mantengono le particelle in circolazione ad una energia costante.

I diversi tipi di acceleratori si suddividono in base alla loro forma in **due grandi famiglie**:

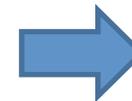
## Lineari



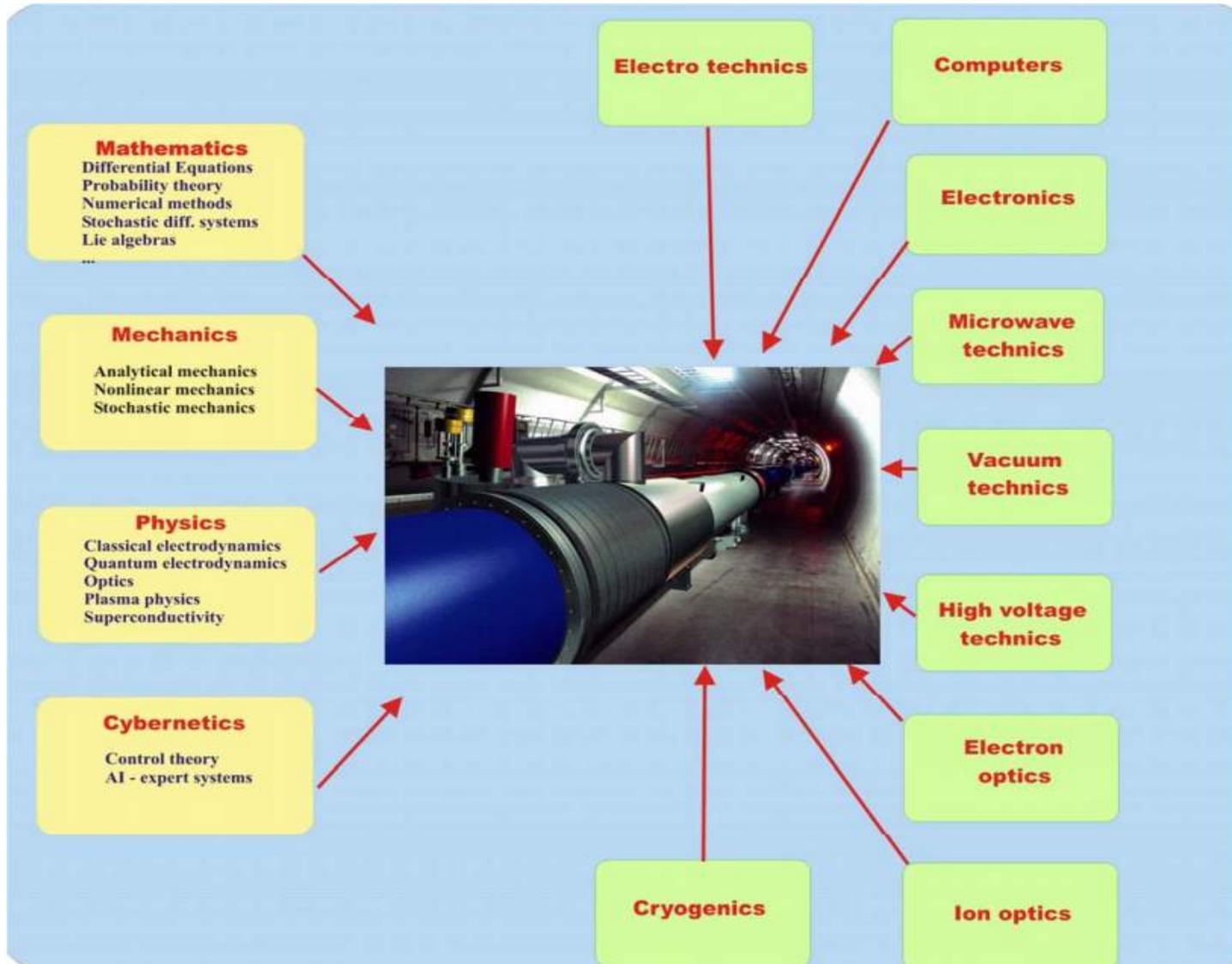
## Circolari



Lo sviluppo degli acceleratori è avvenuto lungo due binari paralleli



# Interdisciplinarietà della fisica e tecnologia degli acceleratori di particelle



# Origine degli acceleratori di particelle per la fisica

I primi acceleratori di particelle (anni '20-'30) furono realizzati per *studiare i costituenti più piccoli della materia*.

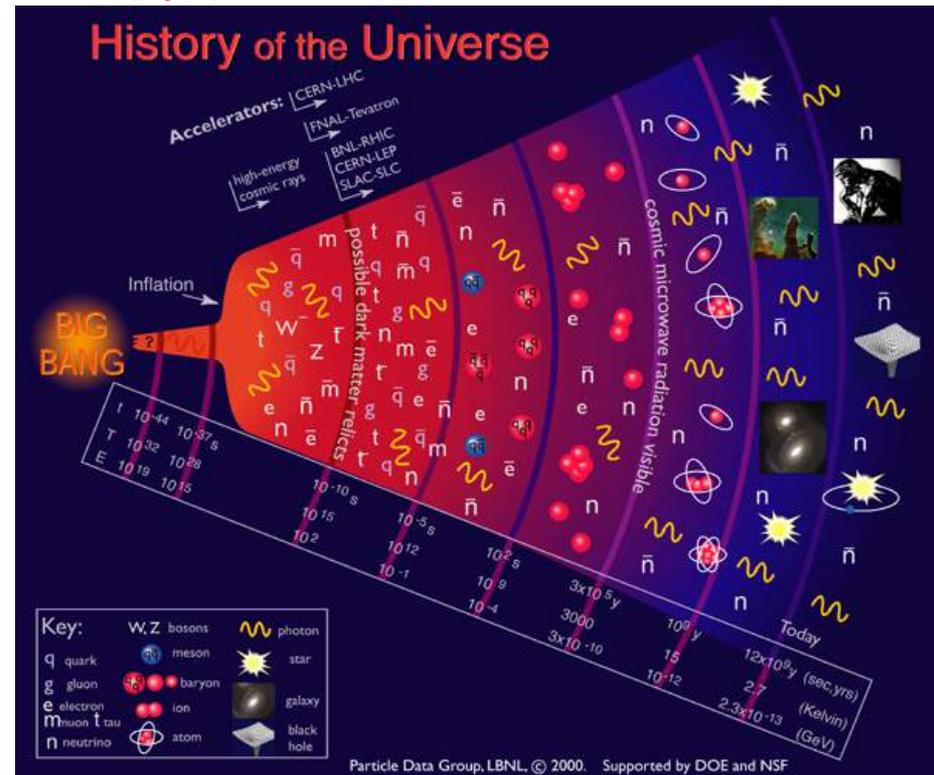
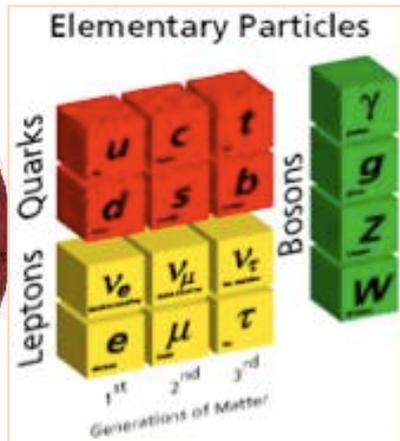
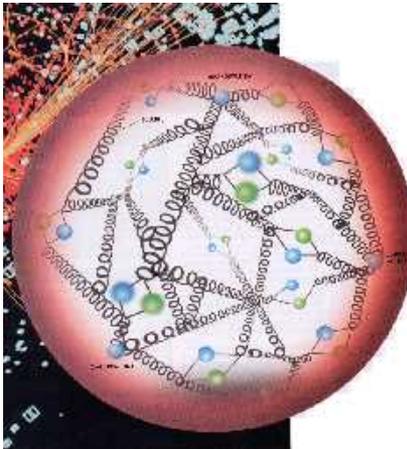
Un fascio di particelle (elettroni, positroni, protoni, ioni,...) che colpisce una targhetta o collide con un altro fascio produce *reazioni nucleari/subnucleari*, annichilazioni, nuove particelle.

Lo studio di questi fenomeni con i rivelatori:



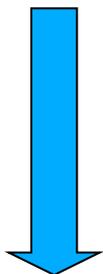
Ricreando densità di energia sempre più elevate, consente di risalire ai primi istanti di vita dell'Universo e di studiarne l'evoluzione (*macchina del tempo*)

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

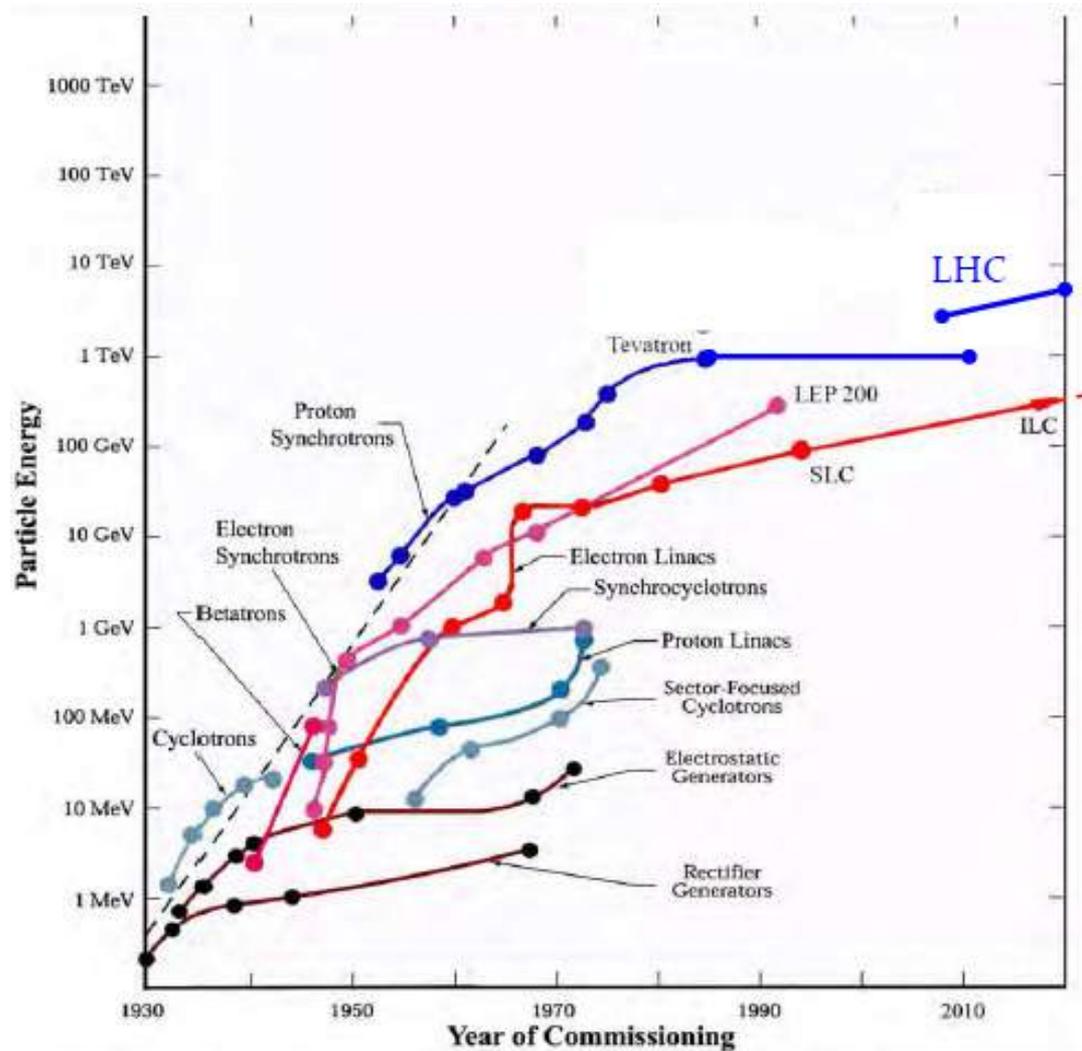


# Sviluppo degli acceleratori di particelle

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



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



Courtesy M. Biagini

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

# Principio di funzionamento di un acceleratore di particelle

I fasci di particelle cariche vengono *accelerati con l'utilizzo di campi elettrici* e vengono deflessi, curvati, foccheggiati con l'utilizzo di *campi magnetici*.

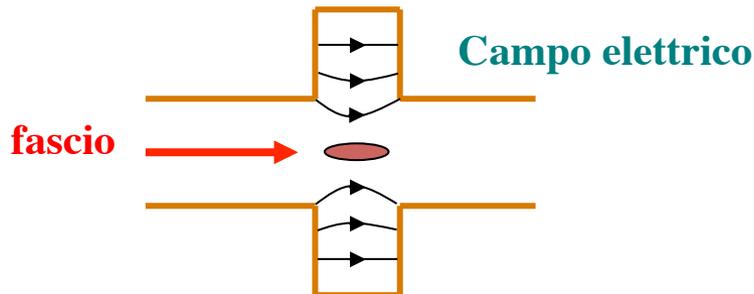
L'equazione base per la descrizione del processo di accelerazione e foccheggiamento, deflessione è rappresentata dalla *Forza di Lorentz*.

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

$\vec{p}$  = momento  
 $m$  = massa  
 $\vec{v}$  = velocità  
 $q$  = carica

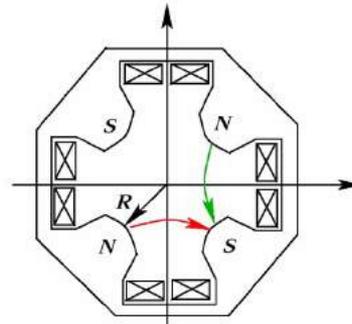
ACCELERAZIONE

$\vec{E}$  = campo elettrico

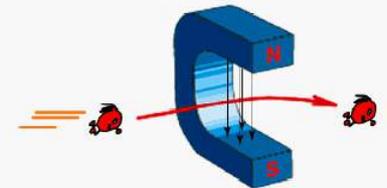


CURVATURA E FOCHEGGIAMENTO

$\vec{B}$  = campo magnetico



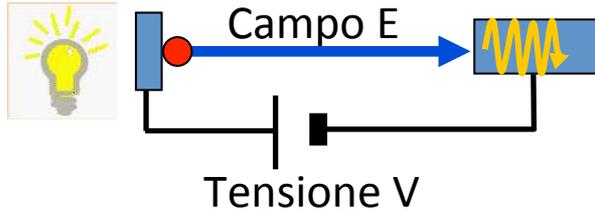
Deflessione  
(campi magnetici)



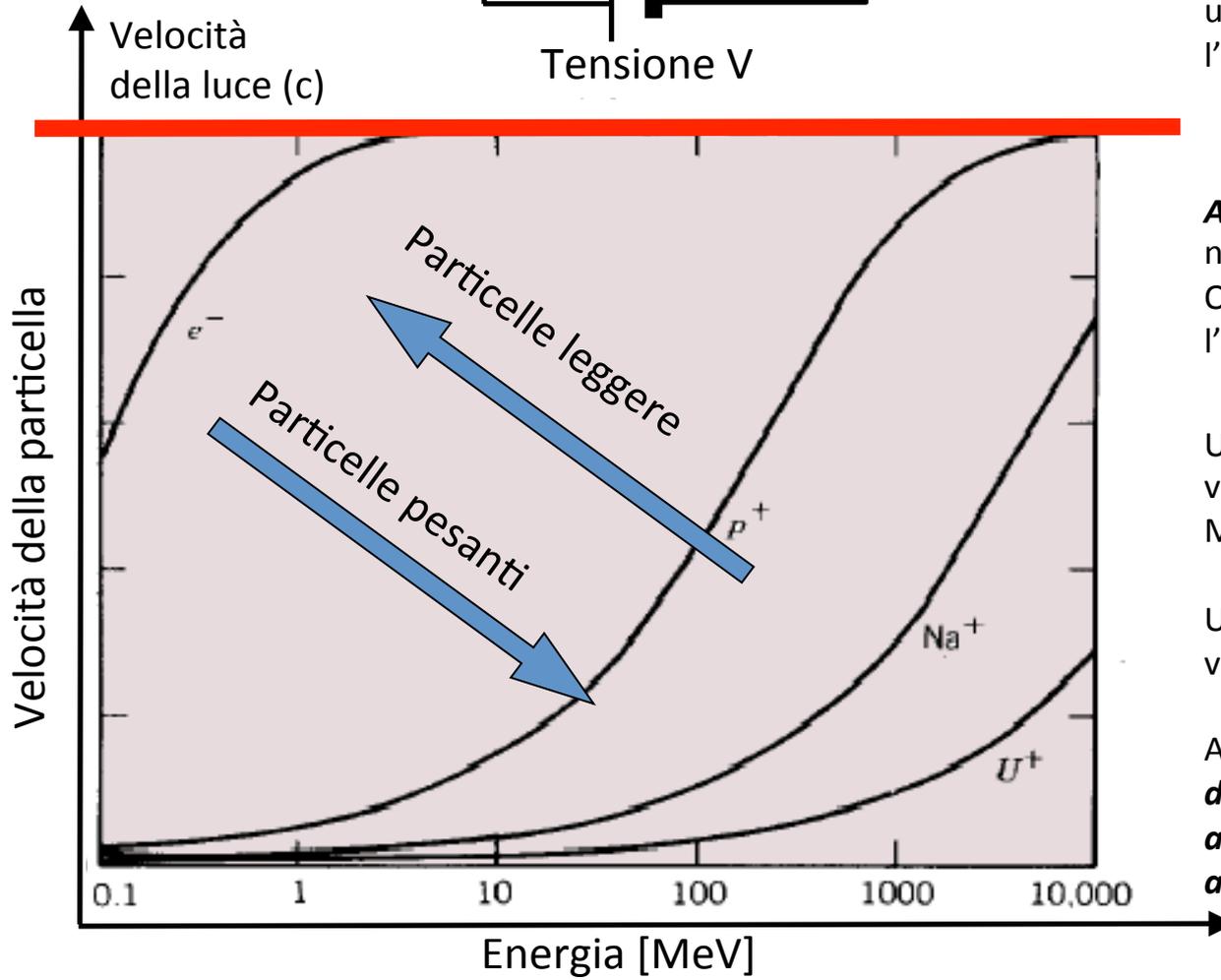
# Accelerazione

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

Il **primo acceleratore** fu un apparecchio, realizzato da Roentgen (Premio Nobel 1901), costituito da un'ampolla a vuoto con dentro un **catodo connesso al polo negativo di un generatore di tensione**. Riscaldato, il catodo, emetteva elettroni che fluivano accelerati dal campo elettrico verso l'anodo (a tensione positiva). Dall'urto con l'anodo gli e<sup>-</sup> producevano raggi X.



**Misura energia:** 1 elettrone accelerato da una differenza di potenziale di 1 V acquista l'energia cinetica di 1eV.



**Accelerare una particella NON significa** necessariamente aumentarne la **velocità**. Quello che aumenta durante l'accelerazione è  $p=mv$ .

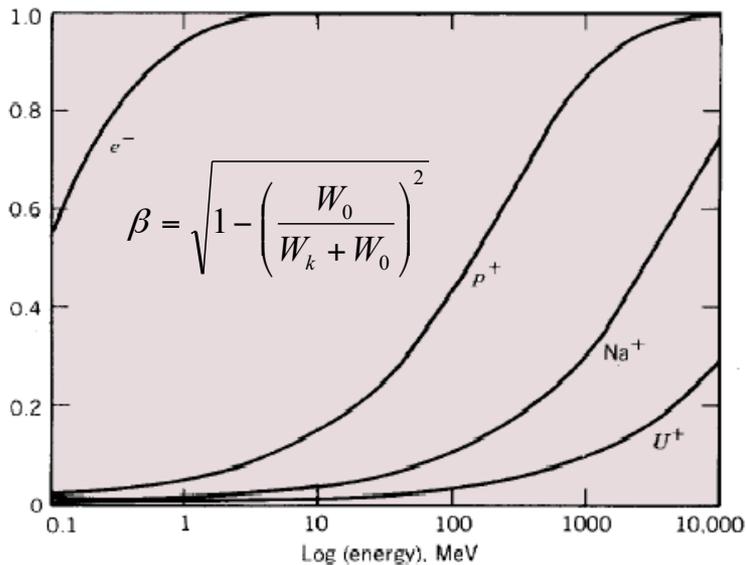
Un **elettrone** diviene relativistico (la sua velocità è prossima a c) quando la sua  $E > 5$  MeV

Un **protone** ha bisogno di un'energia 1000 volte più alta.

Al di sopra di una certa soglia la **velocità della particella diviene costante e, a un aumento di energia, corrisponde solo un aumento di massa relativistica**

# Accelerazione: equazioni

Energia di riposo	Fattore relativistico $\beta$	Fattore relativistico $\gamma$	Energia totale	Energia cinetica
$W_0 = m_0 c^2$	$\beta = v/c,$ $\beta < 1$ sempre	$\gamma = \frac{W}{W_0} = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$ $\gamma \geq 1$ sempre!	$W = \gamma m_0 c^2$ $W^2 = W_0^2 + p^2 c^2$	$W_k = W - W_0 =$ $= (\gamma - 1)m_0 c^2 \approx$ $\approx \frac{1}{2} m_0 v^2$ se $\beta \ll 1$ $\approx \gamma m_0 c^2 \approx pc$ se $\beta \approx 1$
<b>Il Principio della Dinamica</b>		<b>Forza di Lorentz</b>		
$\vec{F} = \frac{d}{dt} \vec{p} = \frac{d}{dt} (m\vec{v})$		$\vec{F} = q (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$		



$$\Delta W = v \Delta p \Rightarrow \Delta W = q E_z \Delta z$$

$$m_e^0 = 9.109 \cdot 10^{-31} [\text{Kg}] = 0.511 \left[ \frac{\text{MeV}}{c^2} \right]$$

$$m_p^0 = 1.673 \cdot 10^{-27} [\text{Kg}] = 938.3 \left[ \frac{\text{MeV}}{c^2} \right]$$

Alle energie tipiche di lavoro degli acceleratori attualmente esistenti i **leptoni** sono particelle **totalmente relativistiche** ( $\gamma \gg 1$ , ad eccezione della primissima fase di accelerazione). Questo non è necessariamente vero per **protoni e ioni** che nella maggior parte delle applicazioni sono accelerati ad energie alle quali si comportano come particelle **debolmente relativistiche**.

# Energia: ordini di grandezza

L' eV rappresenta un'energia molto piccola

$$1 \text{ eV} = 1\text{V} \cdot 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C} = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$



Un proiettile da 55 g lanciato a 300 m/s ha un'energia di 450 J



Ma ogni singolo protone o neutrone del proiettile ha una energia cinetica piccolissima  $450 / N_A = 7.5 \cdot 10^{-22} \text{ J} = 0.005 \text{ eV}$ !



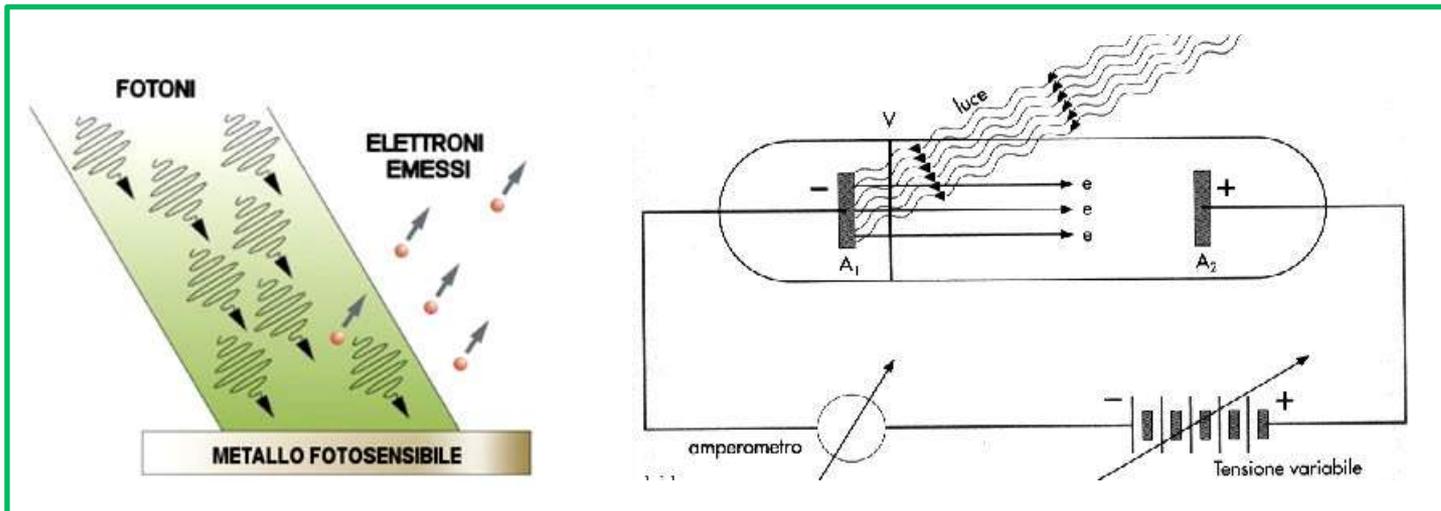
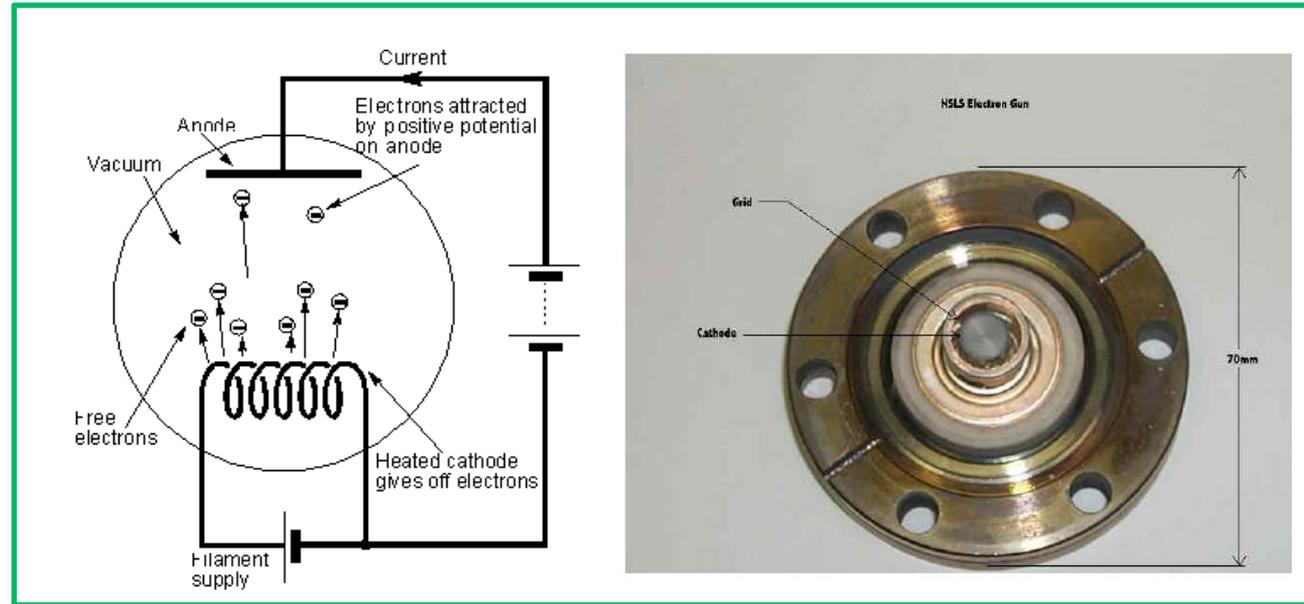
In un **acceleratore come LHC** si raggiungono energie per ogni protone di 7 TeV!

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



# Sorgenti di particelle

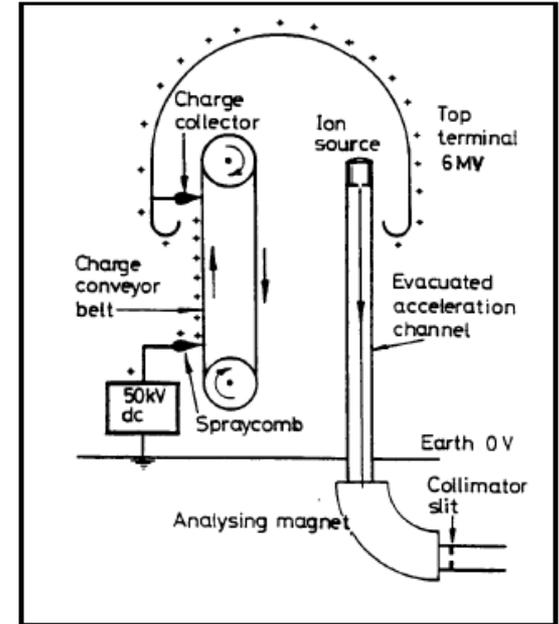
Fasci di elettroni si possono per esempio generare per effetto termoionico o fotoelettrico



# Acceleratori Lineari (LINAC) Elettrostatici

Per aumentare l'energia massima delle particelle accelerate **Van de Graaff** pensò realizzare un **generatore elettrostatico** nel quale le cariche, per mezzo di una cinghia non conduttrice, venivano trasportate ad un terminale isolato nel quale veniva posta la sorgente di particelle.

Pressurizzando il contenitore dell'acceleratore si possono ottenere differenze di potenziale fino a **15 MV e quindi energie fino a  $E \sim 15\text{MeV}$** . Oltre tale limite NON si può andare a causa di fenomeni di scarica elettrica, rottura degli isolanti, ecc..



## APPLICAZIONI

Ad oggi ce ne sono ~350 nel mondo e, tipicamente,  $V < 5\text{MV}$   $I < 100\text{mA}$ . Sono usati per:

Analisi dei materiali:

*ad es. Controllo struttura semiconduttori;  
emissione raggi X;*

Modifica dei materiali:

*impiantazione ionica per l'industria dei  
semiconduttori*

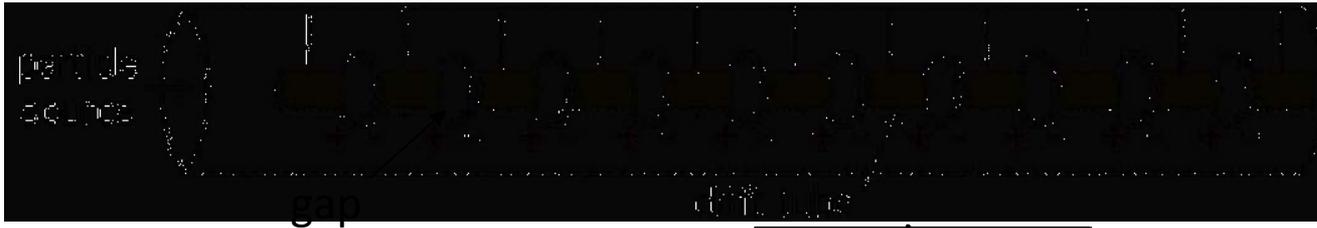


# Moderni Acceleratori Lineari

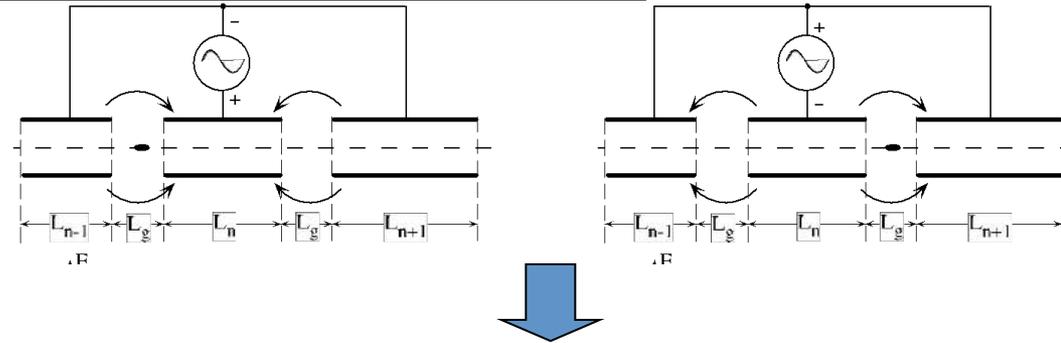
## PRINCIPIO:

Le particelle vengono accelerate dal campo elettrico longitudinale generato da *elettrodi susseguenti*

L'idea di *Ising* (1924) fu applicata da *Wideroe* (1927) che applicò una tensione variabile nel tempo (sinusoidale) ad una sequenza di **tubi di drift**. In questo caso le particelle non «sentono» campo accelerante quando si muovono all'interno di ciascun tubo di drift e vengono accelerate in corrispondenza dei **gaps**. Tali strutture si chiamano LINAC a Tubi di Drift (DTL).



Se la lunghezza dei tubi cresce con la velocità delle particelle in modo tale che il **tempo di attraversamento** di ciascun tubo sia sempre uguale a **mezzo periodo** del generatore di tensione, è possibile sincronizzare la tensione accelerante col moto delle particelle ed ottenere un guadagno di energia  $\Delta E = q\Delta V$  ad **ogni attraversamento** di un gap.

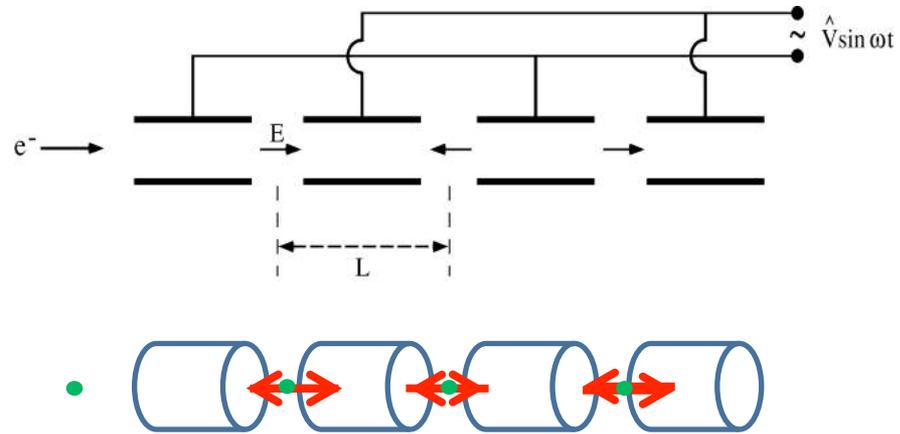


$$\frac{L_n}{v_n} = \frac{T_{RF}}{2} \Rightarrow L_n = \frac{1}{2} v_n T_{RF} = \frac{1}{2} \beta_n \lambda_{RF}$$

La condizione  $L_n \ll \lambda_{RF}$  (senza la quale non possiamo considerare i tubi superfici equipotenziali) implica  $\beta \ll 1$ . La tecnica di Wideröe *non è utilizzabile* per particelle *relativistiche*.

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

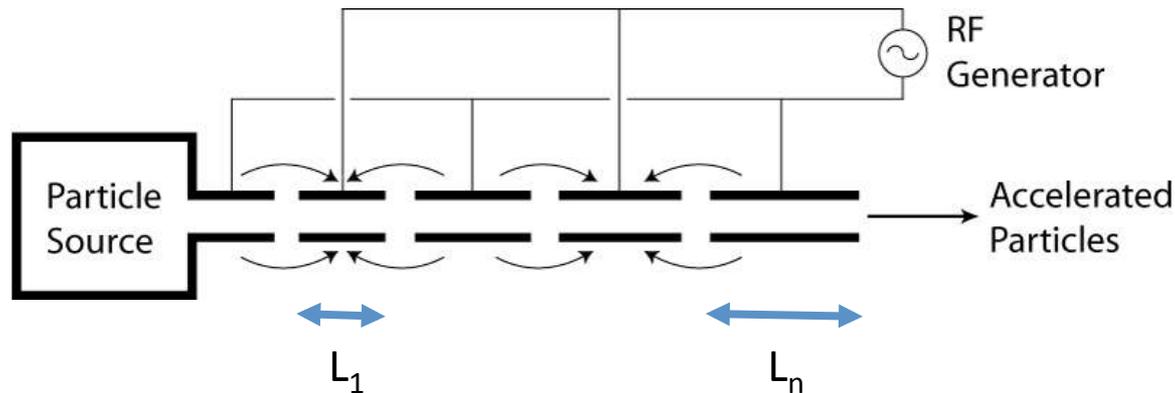
Basic idea: the particles are accelerated by the electric field in the gap between electrodes connected alternatively to the poles of an AC generator. This original idea of **Ising** (1924) was implemented by **Wideroe** (1927) who applied a sine-wave voltage to a sequence of **drift tubes**. The particles **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)**.



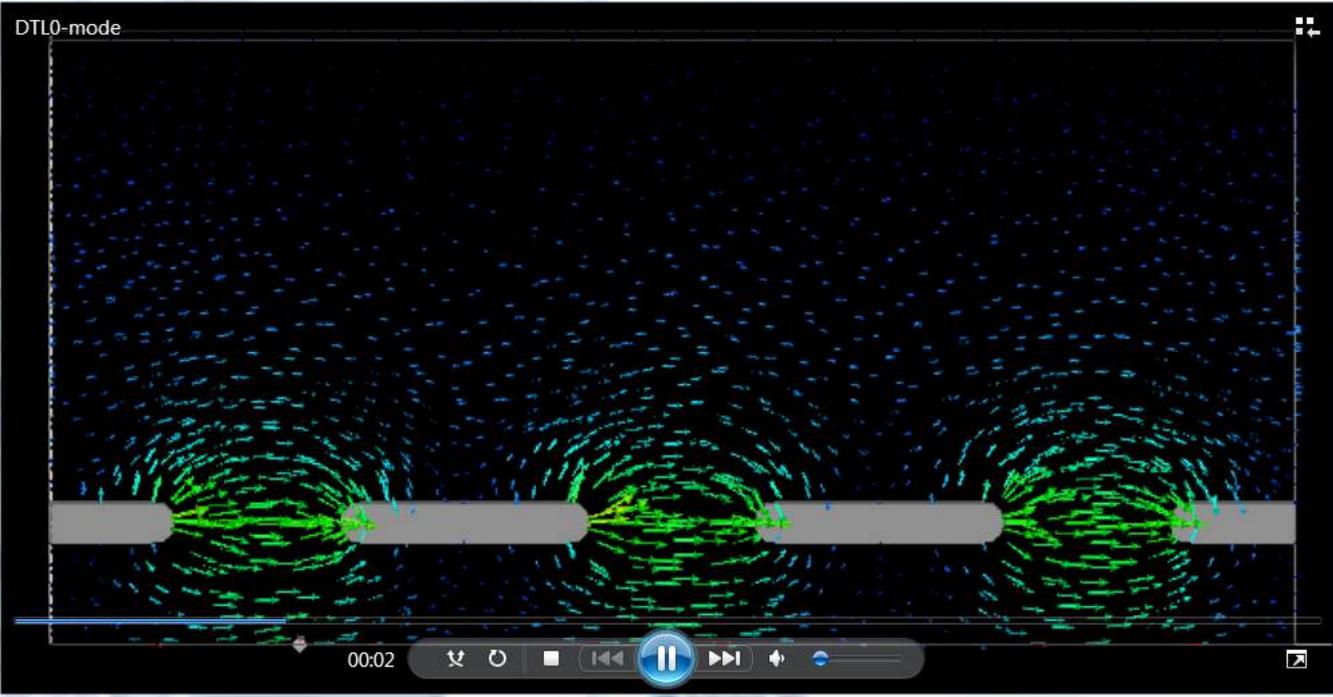
⇒ If the **length of the tubes** increases with the particle velocity during the acceleration such that the time of flight is kept constant and equal to half of the RF period, the particles are subject to a **synchronous accelerating voltage** and experience an energy gain of  $\Delta E = q\Delta V$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

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

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

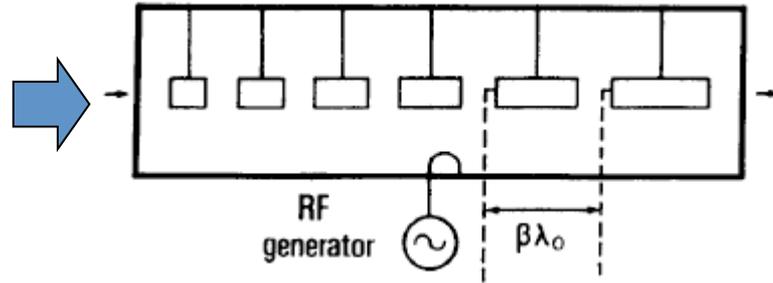
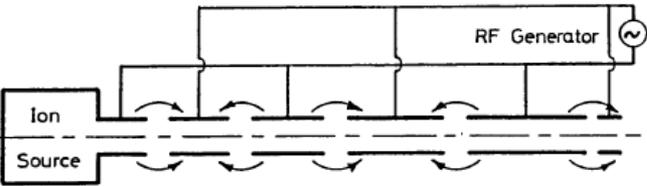
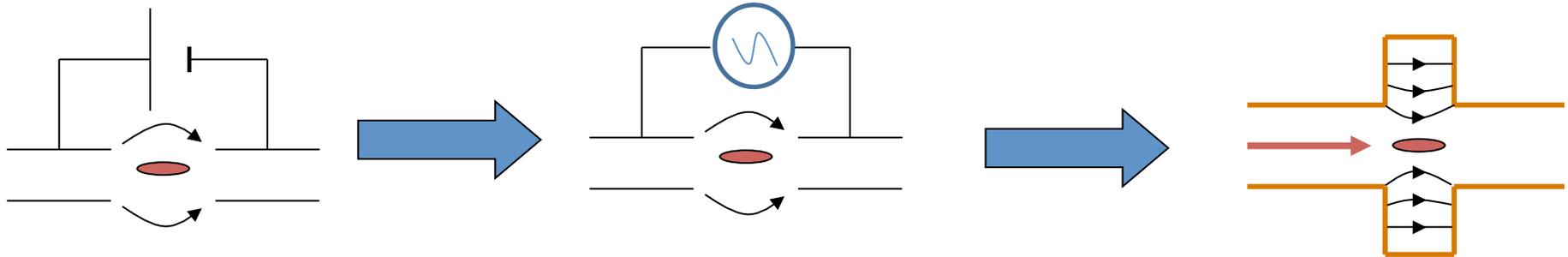


# DTL: video

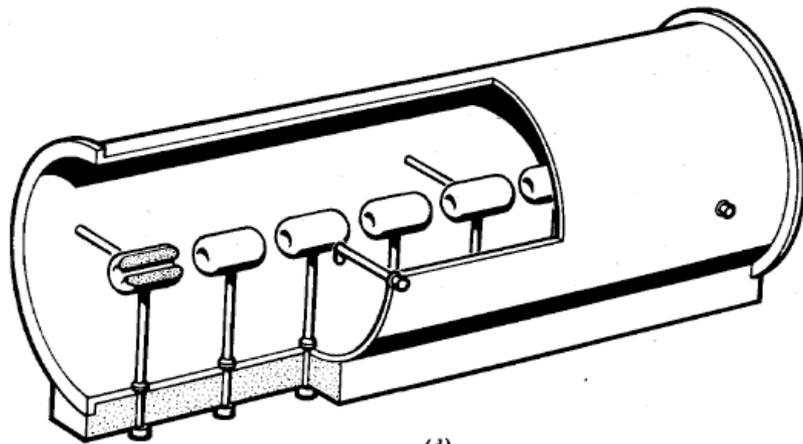


# Accelerazione con campi elettrici a radiofrequenza

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



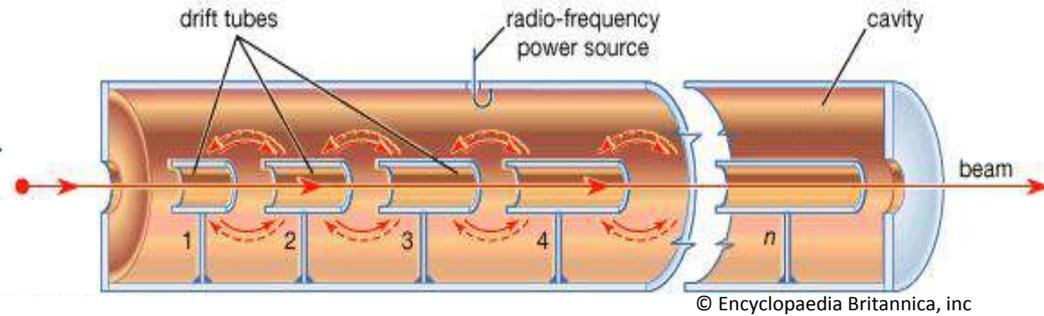
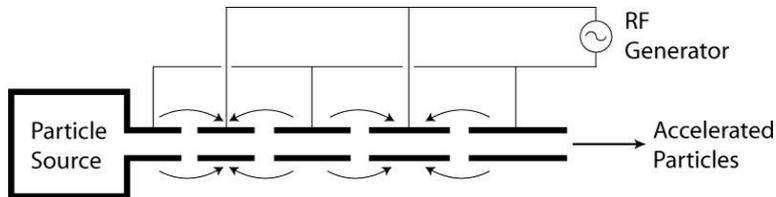
La struttura accelerante diventa una **cavità risonante** (struttura metallica chiusa) in cui viene accumulata l'energia sottoforma di campi elettromagnetici a RF



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

# ALVAREZ STRUCTURES

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



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

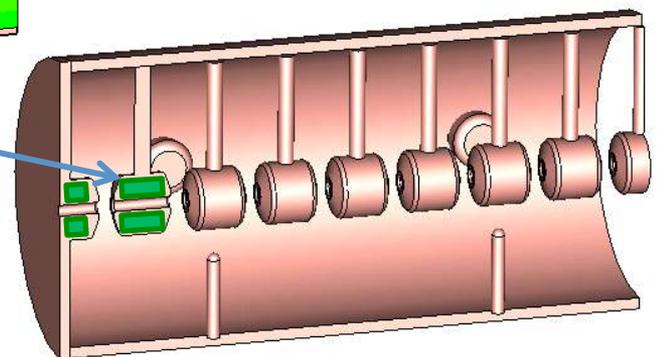
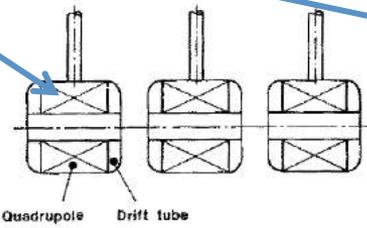
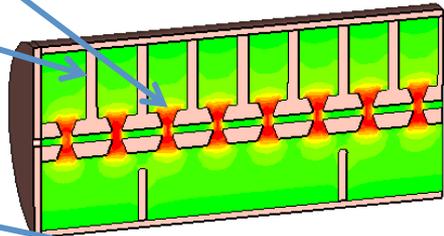
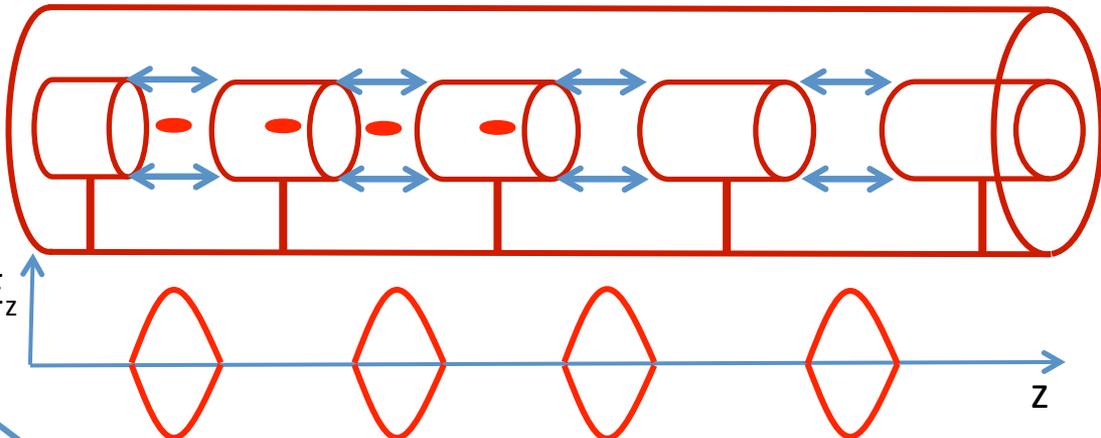
⇒The beam is inside the "**drift tubes**" when the electric field is decelerating. The **electric field** is concentrated between gaps;

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

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

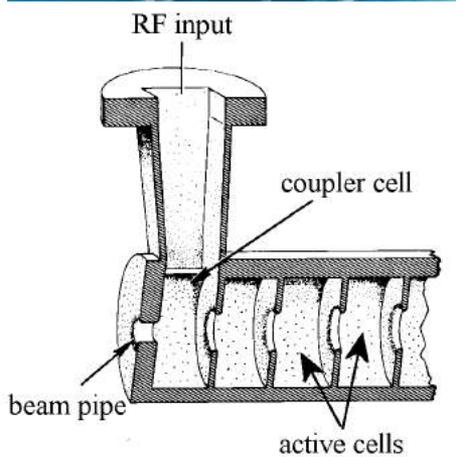
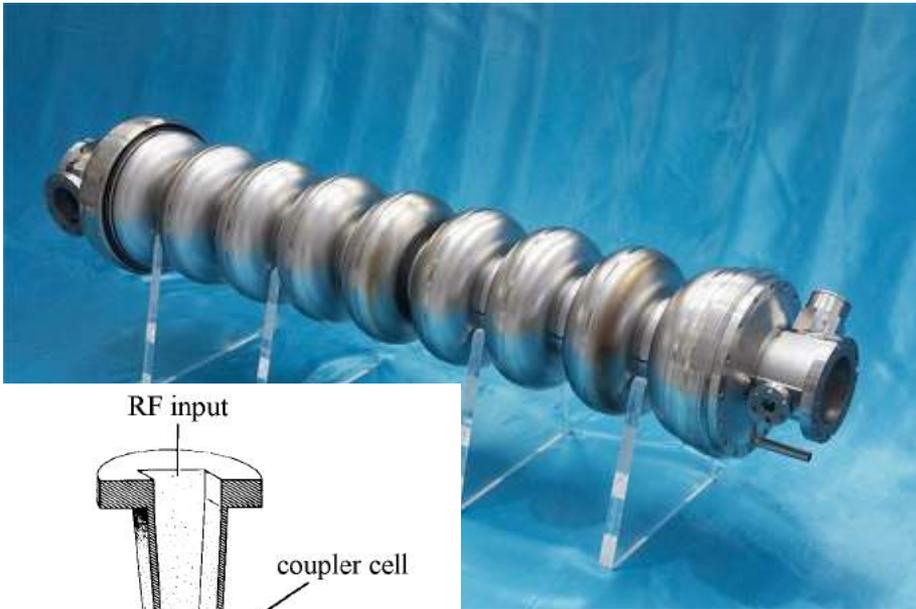
⇒In order to be synchronous with the accelerating field at each gap the **length of the n-th drift tube**  $L_n$  has to be:

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



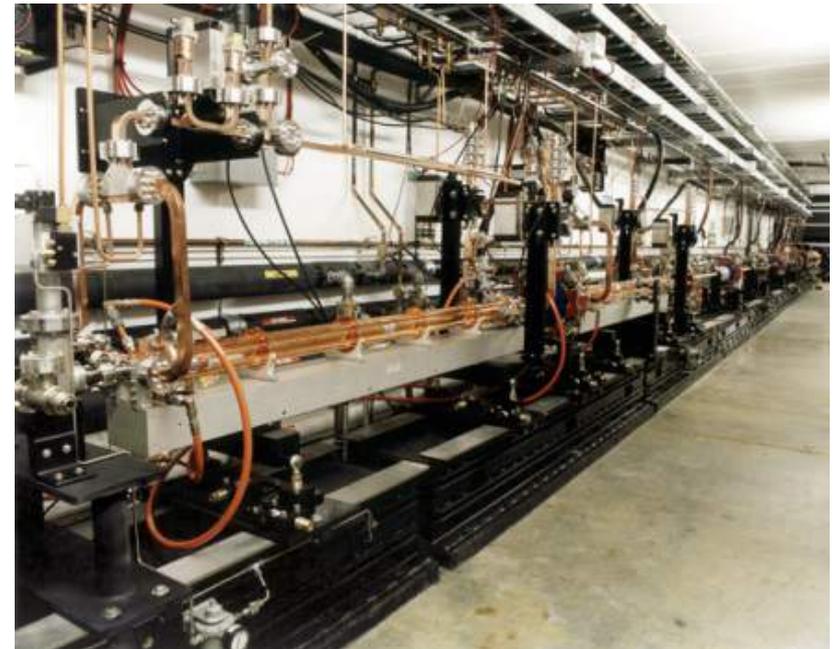
# Cavità a Radiofrequenza

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



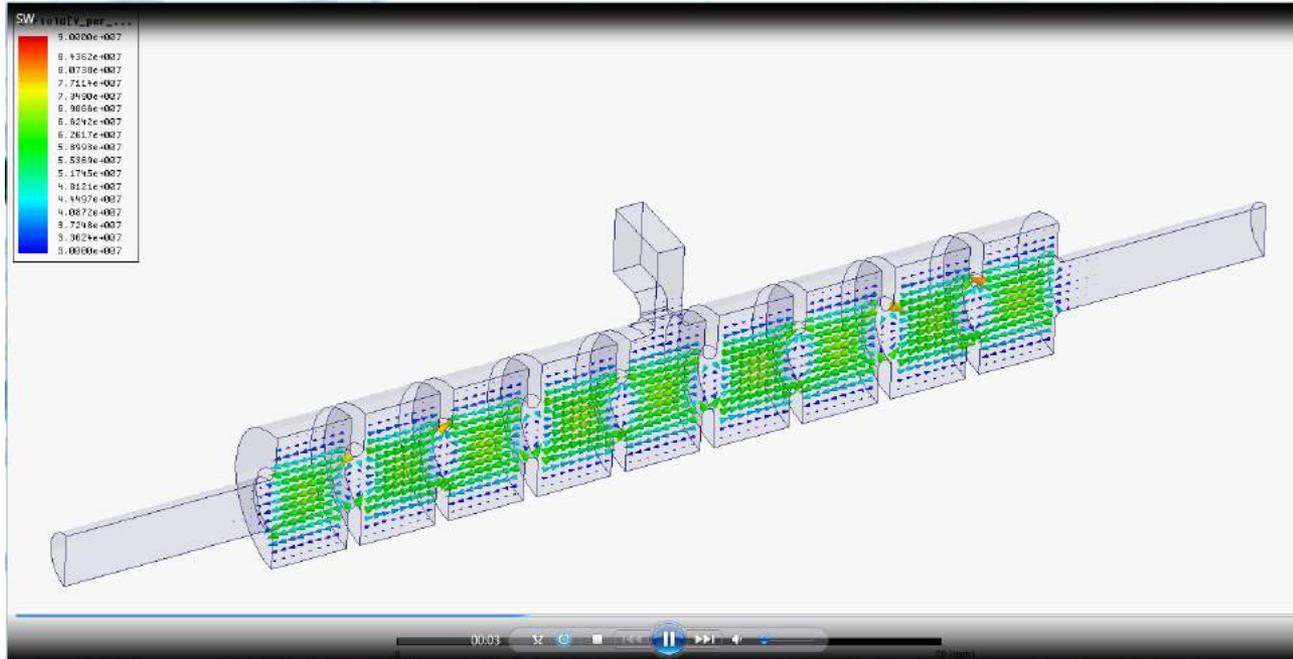
Esistono sia cavità che operano a **temperatura ambiente** (tipicamente in rame) che **cavità superconduttive** che operano a qualche K.

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**.



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

# Cavità a Radiofrequenza: video



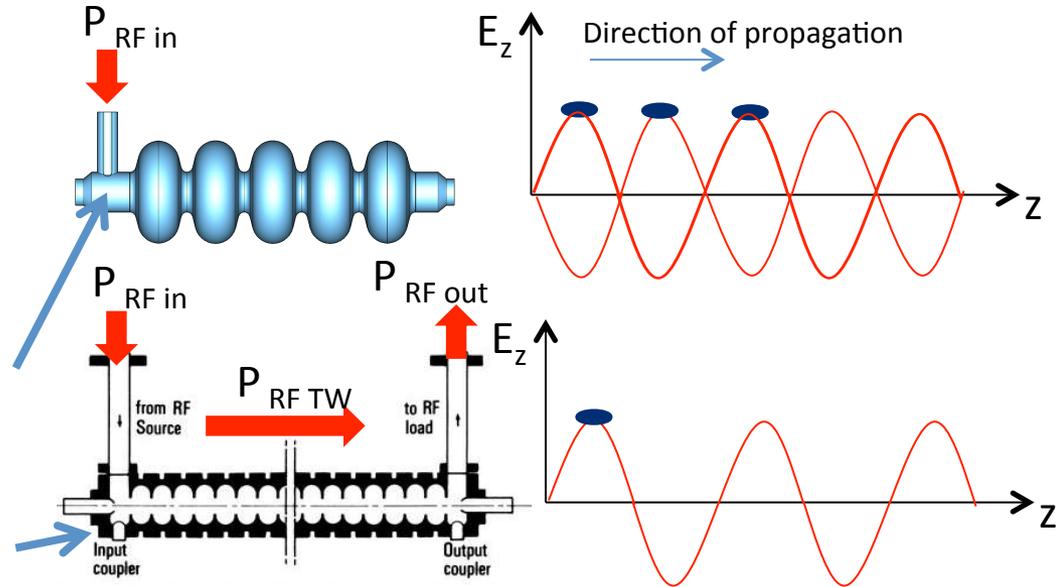
# ACCELERATING CAVITIES

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

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  $e^-$ ).



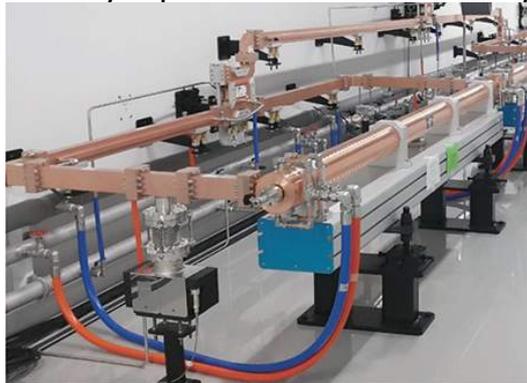
⇒ The structures are powered by RF generators (typically **klystrons**).

⇒ 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)**;

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

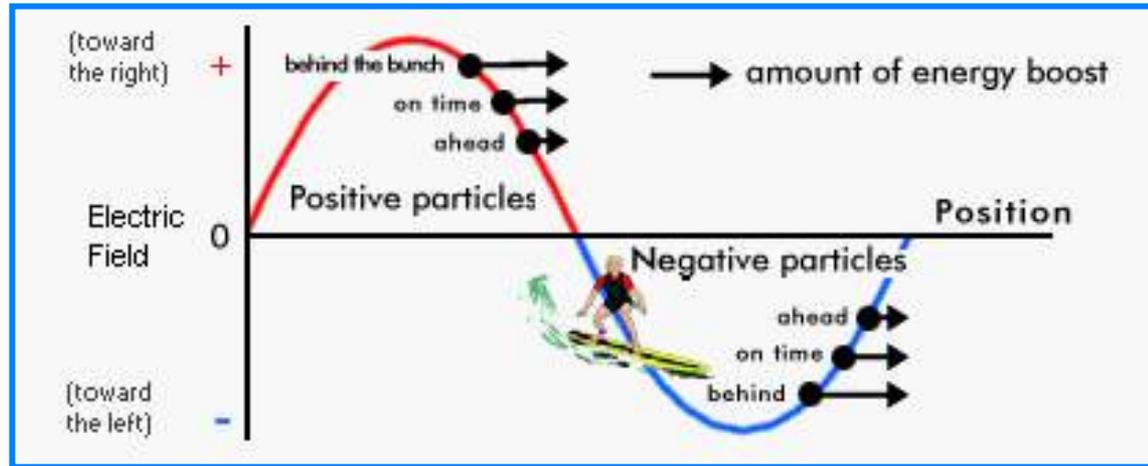
- **accelerating gradient** (MV/m);
- **RF pulse length** (how many bunches we can contemporary accelerate);
- **Duty cycle**: pulsed operation (i.e. 10-100 Hz) or continuous wave (CW) operation;
- **Average beam current**.



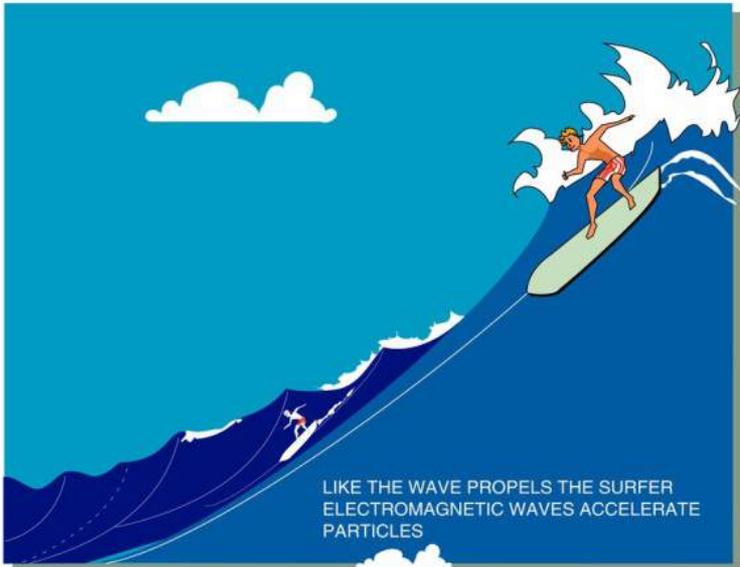
# Principio di stabilità di fase in caso di accelerazione con campi RF

Il *campo accelerante è una sinusoide*. Le particelle che arrivano in anticipo rispetto alla “posizione ideale” (detta fase sincrona) verranno accelerate di meno mentre quelle in ritardo vedranno un campo più intenso. Le particelle oscilleranno quindi attorno alla fase corretta raggruppandosi longitudinalmente in **pacchetti** (*bunches*).

Questo è vero nei LINAC per particelle pesanti ove ad un aumento di energia corrisponde una variazione di velocità. Per i LINAC di elettroni le particelle sono «congelate» in posizione in quanto la loro velocità non cambia con l'energia.



**PACCHETTO DI PARTICELLE:** nei moderni acceleratori le particelle sono accelerate in pacchetti. Ogni pacchetto può contenere miliardi di particelle

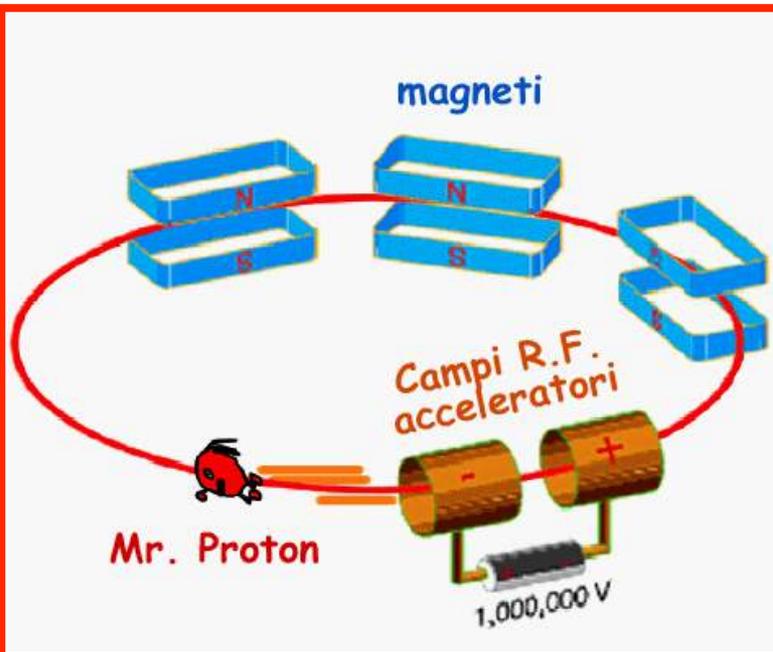
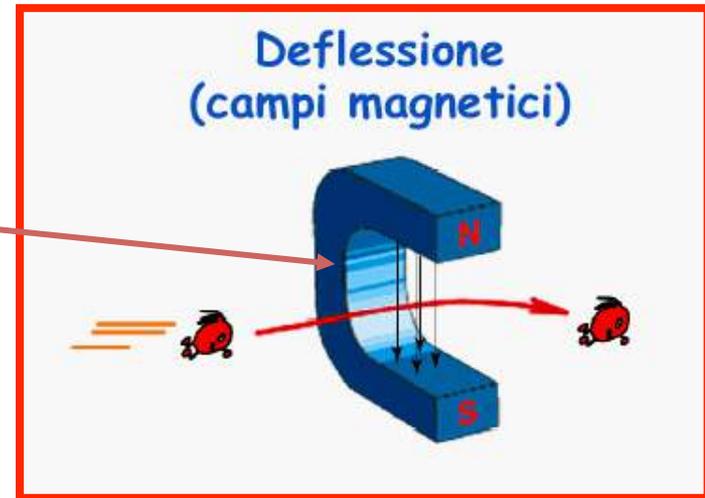


# Campi Magnetici: deflessione e focalizzazione

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

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

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

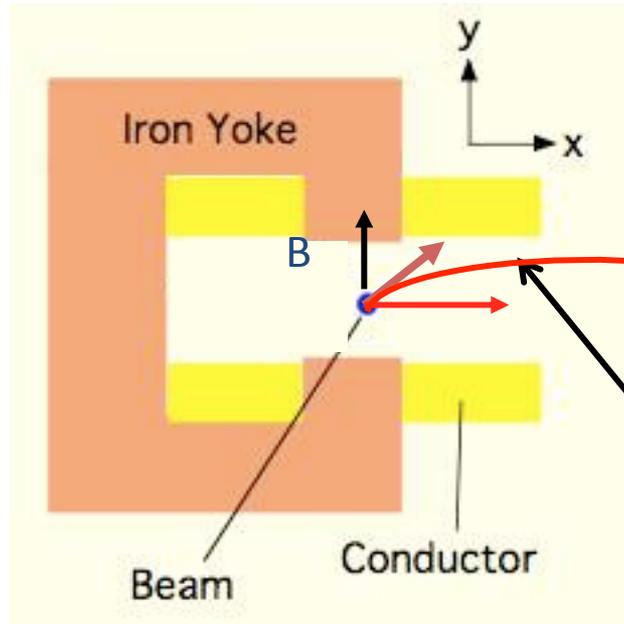
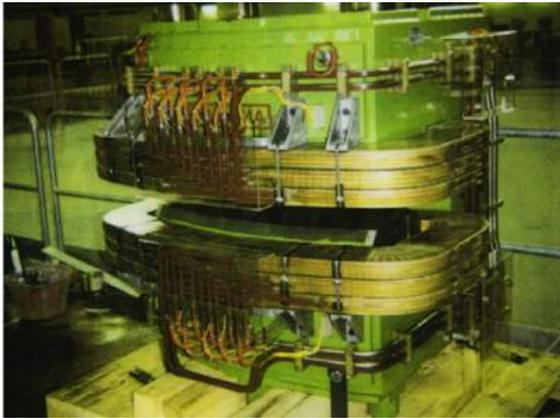
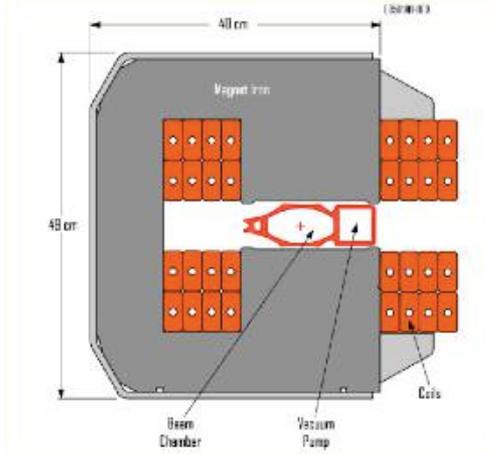


Particelle che viaggiano in un **acceleratore lineare** attraversano **una sola volta** la struttura accelerante mentre in un **acceleratore circolare** attraversano **più volte** la stessa cavità.

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

# Dipoli: deflessione

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



Traiettoria circolare

Raggio di curvatura

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

**Rigidità magnetica** del fascio di particelle è definita come  $B\rho$   $B\rho[Tm] = \frac{p}{q} \cong \frac{W}{cq}$

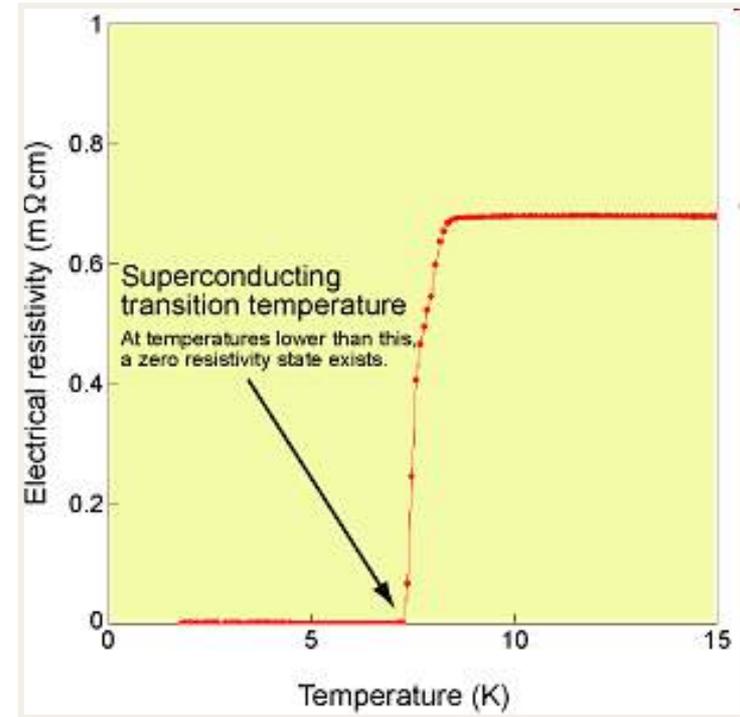
I dipoli elettromagnetici vengono usati per produrre  $B$  non oltre 1-2 T.  
Per campi magnetici più intensi si ricorre a **magneti superconduttori**

Per particelle  
ultra-relativistiche

# 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

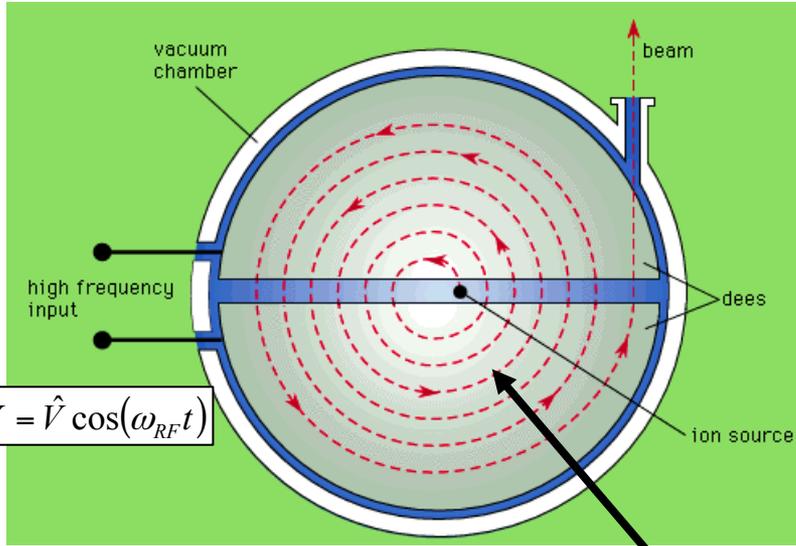


Basse temperature: 2 Kelvin = -271° C

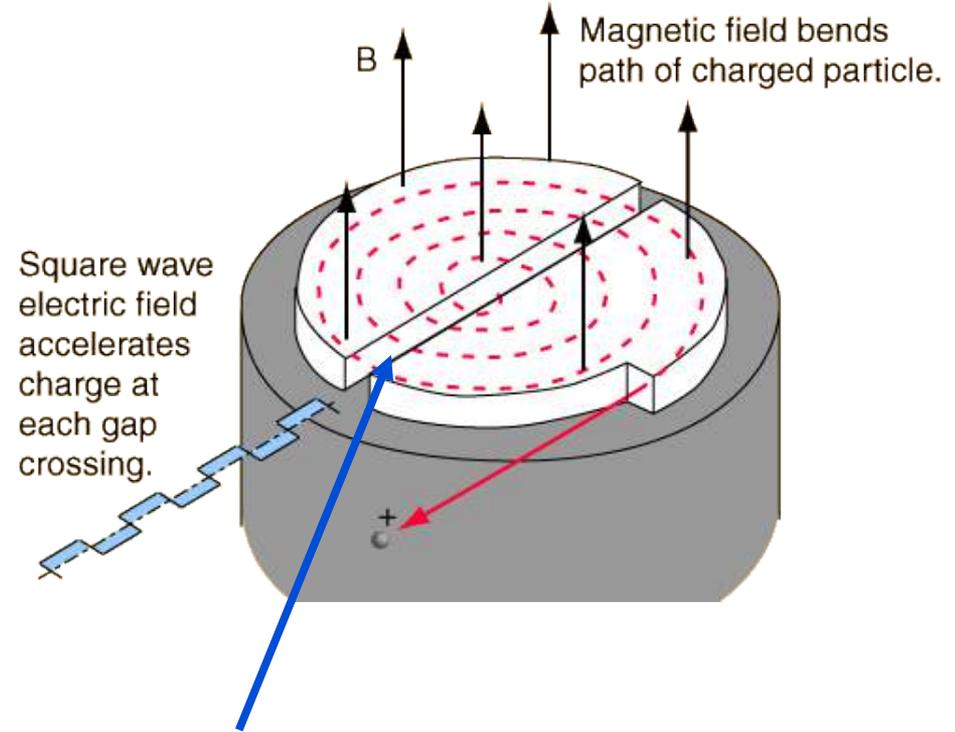
Tali temperature sono ottenute raffreddando i conduttori con un dispositivo frigorifero che usa **He superfluido: il criostato**

# 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*.

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

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

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

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

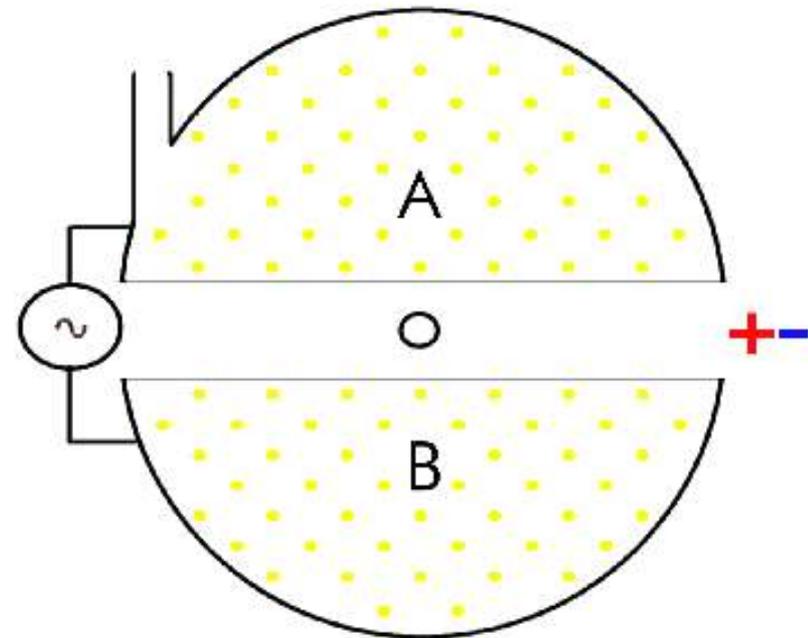
# Ciclotroni (2/2)



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**.

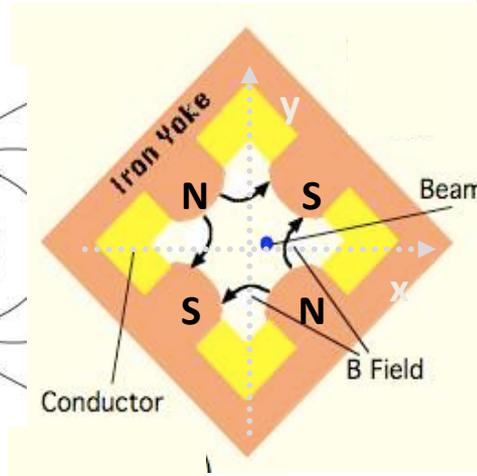
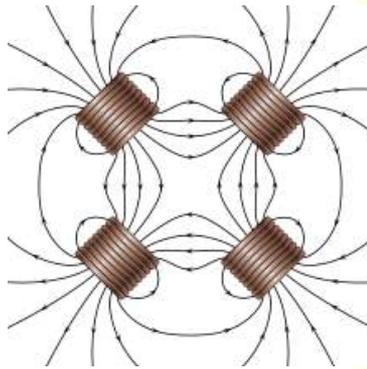
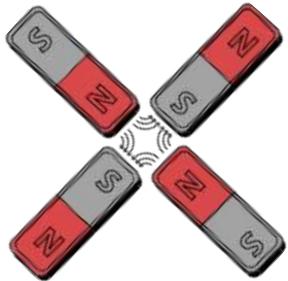


# Quadrupolo: foccheggio

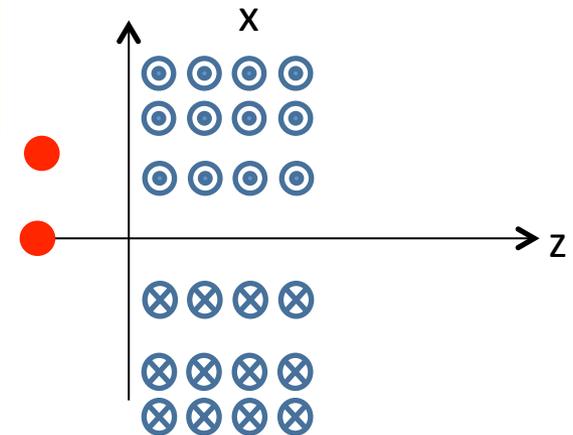
E' un magnete con **4 poli** che foccheggio le traiettorie delle singole **particelle** così come fa una lente con la luce.

Caratteristiche di B

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



$$B_x = g \cdot y$$
$$B_y = g \cdot x$$
$$g = \left[ \frac{T}{m} \right]$$

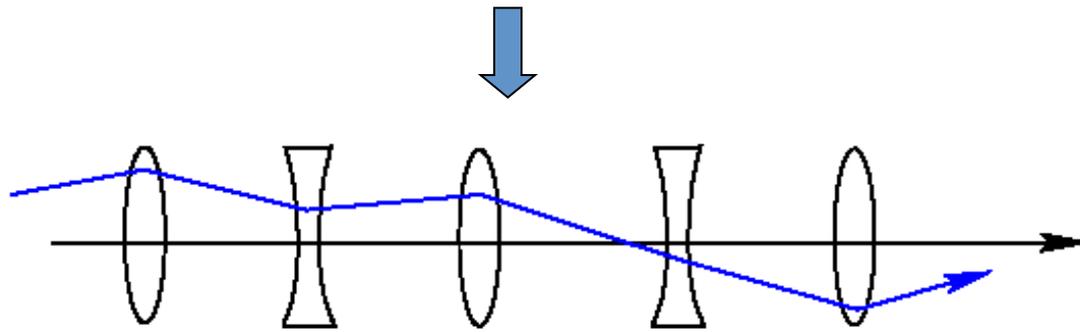


# Foccheggiamento trasverso: funzione $\beta$

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

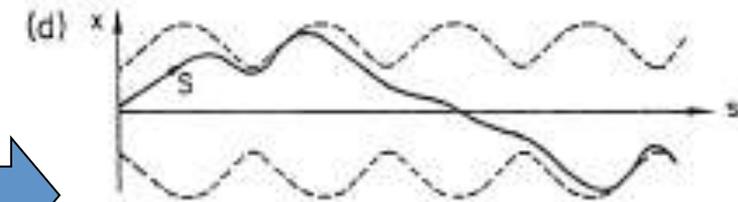
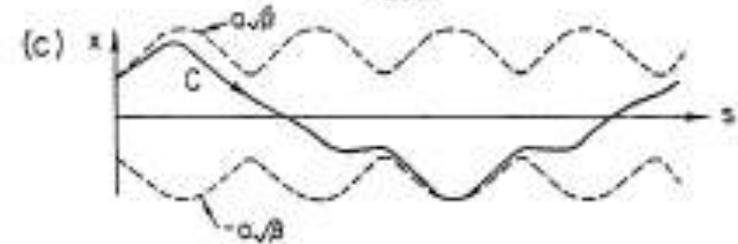
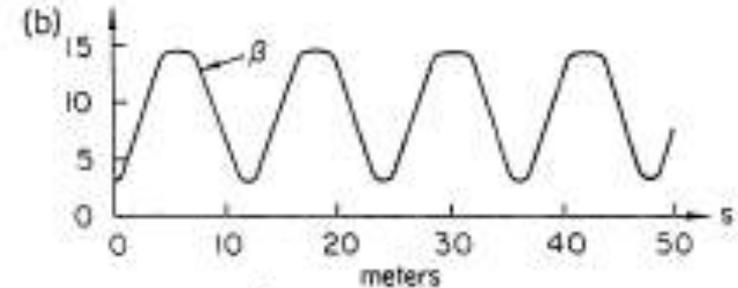
Per ottenere il *foccheggiamento complessivo* di un fascio di particelle lungo un canale di trasporto o in un acceleratore circolare bisogna usare una *sequenza di quadrupoli con il segno alternato*

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  $\beta$** .



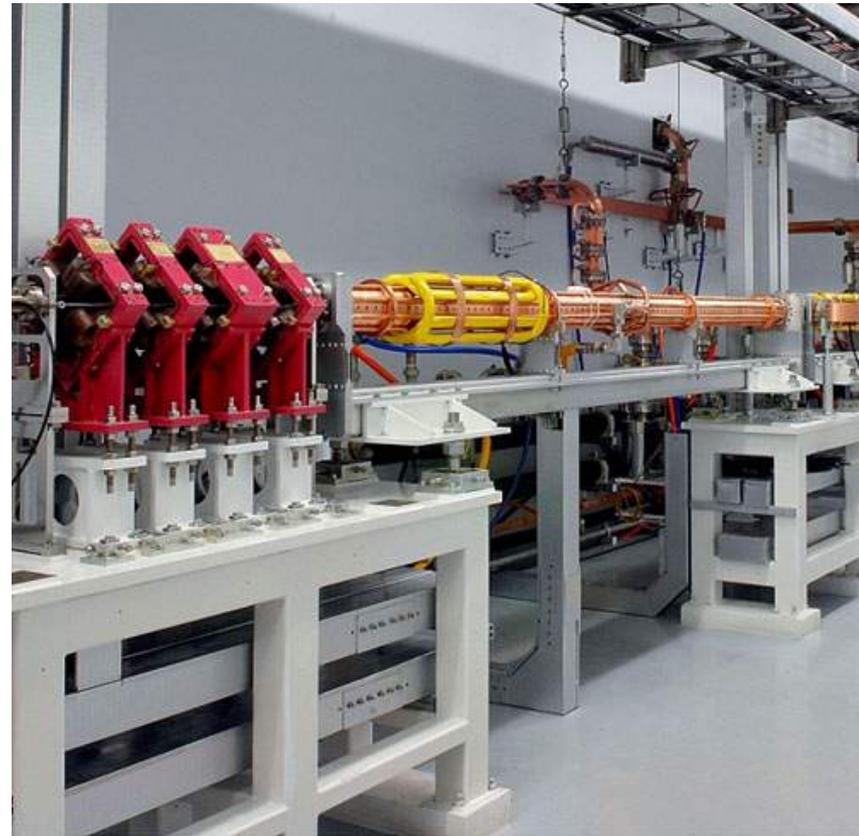
# Struttura finale di un LINAC

Un 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.

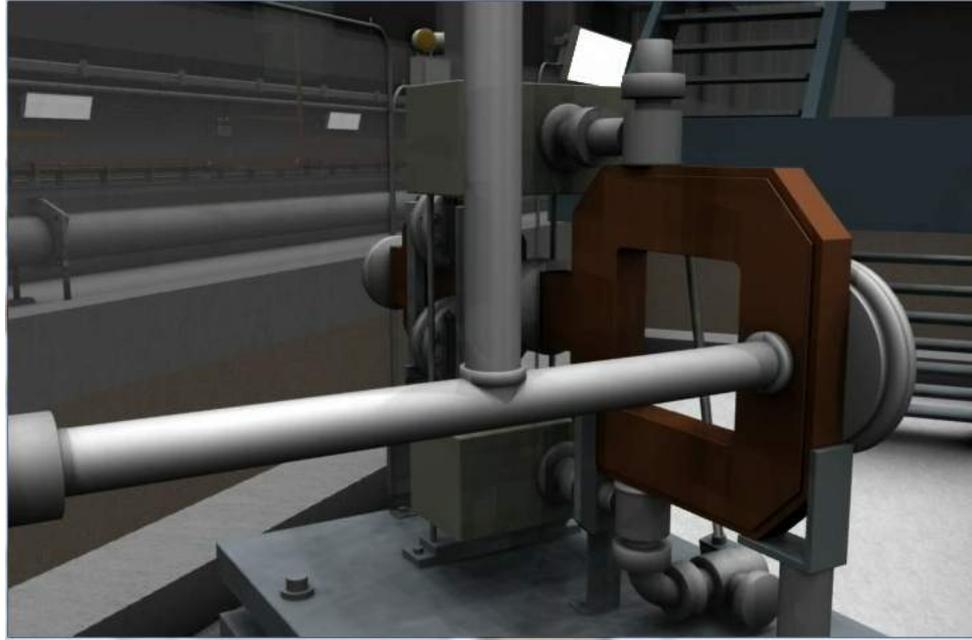


Il **VUOTO** in un acceleratore di particelle è tipicamente dell'ordine di  $10^{-8}$ - $10^{-10}$  mbar.

Se non si raggiungessero tali pressioni, le particelle verrebbero perse a causa degli urti con le molecole di gas.



# Accelerazione in un LINAC: video



# Acceleratori circolari: il Sincrotrone

Il *sincrotrone* è un *acceleratore di particelle circolare*.

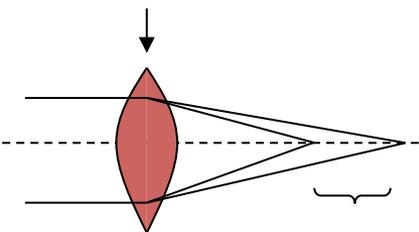
A differenza del LINAC, nel sincrotrone, *le particelle descrivono orbite chiuse* grazie all'utilizzo di magneti curvati (*dipoli*) che deflettono le particelle. Il *campo elettrico è sincronizzato con il fascio* delle particelle in modo che ad ogni passaggio successivo in cavità queste aumentano la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

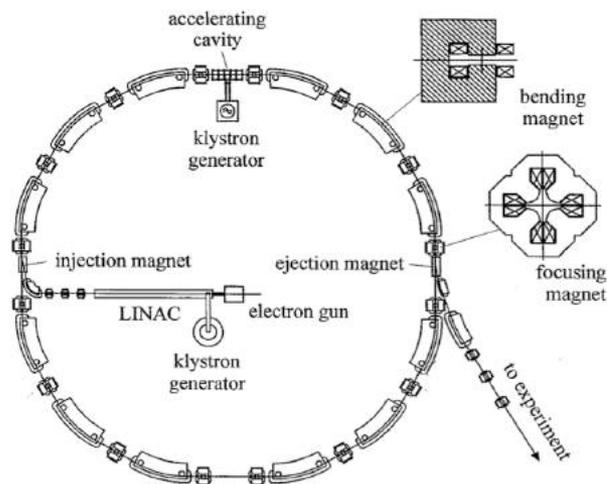


I sestupoli correggono l'effetto cromatico dei quadrupoli

## QUADRUPOLO



Particelle con diversa energia vengono focalizzate in modo diverso: aberrazione cromatica



**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

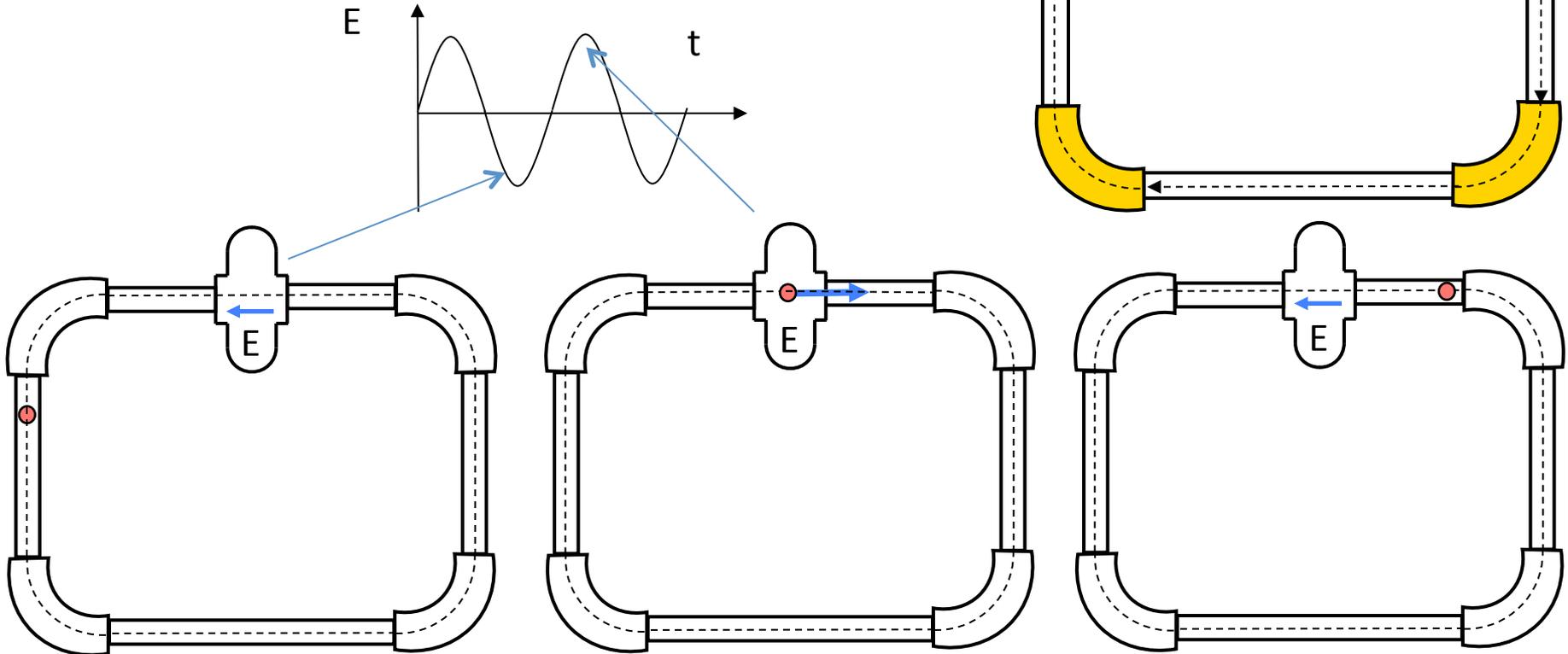
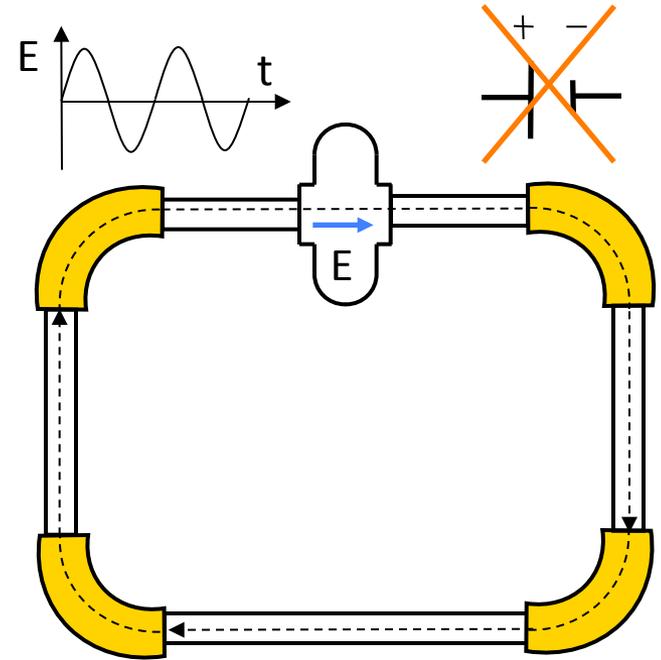
**CAMERA DA VUOTO**

**DIAGNOSTICA**

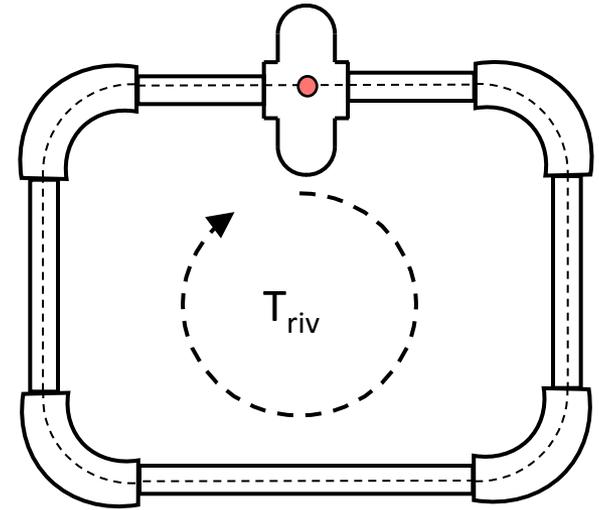
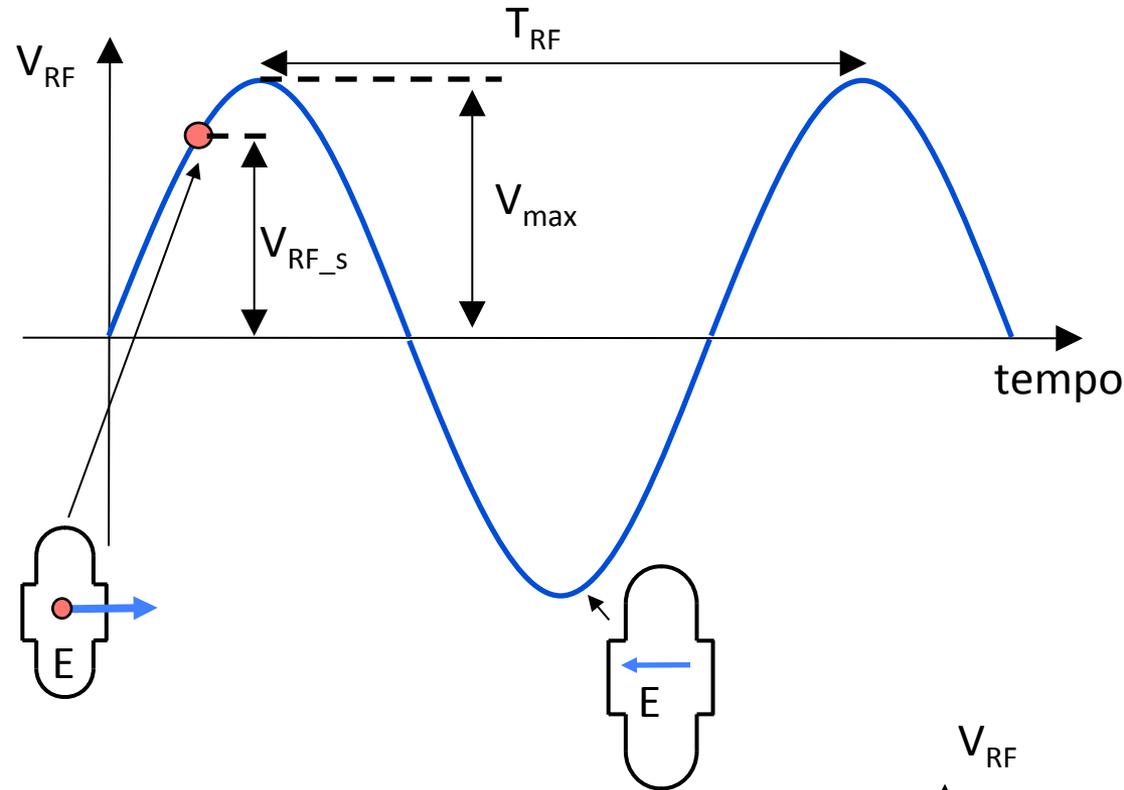


# Accelerazione in un sincrotrone

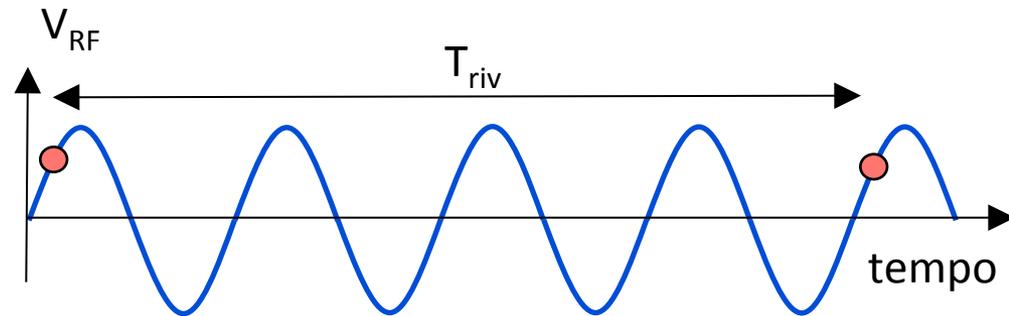
Il **campo elettrico** in cavità accelera le particelle e **non può essere elettrostatico** ma deve avere necessariamente **carattere oscillatorio** nel tempo altrimenti in un giro completo una particella guadagnerebbe energia nella cavità e la perderebbe nella rimanente parte dell'acceleratore-principio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

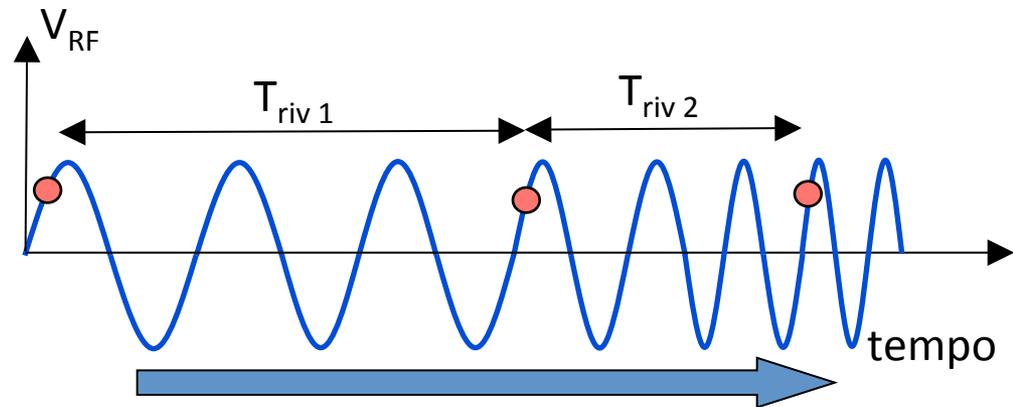
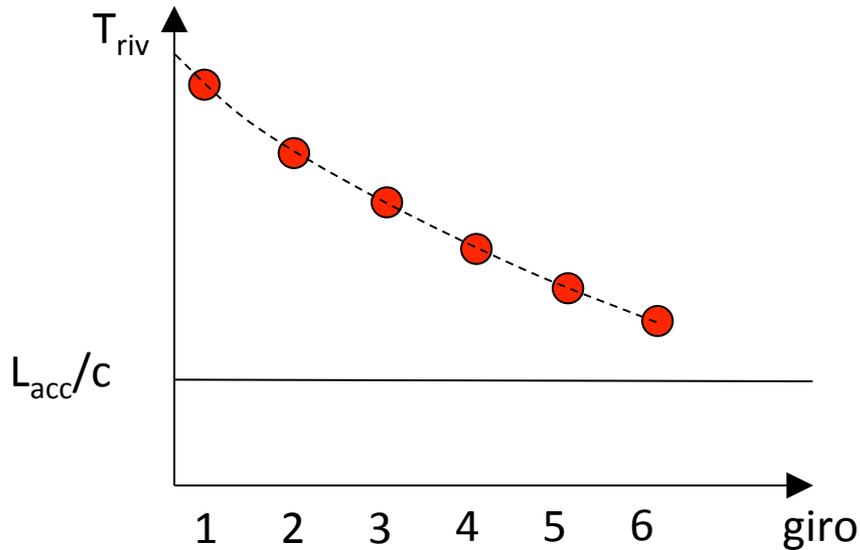
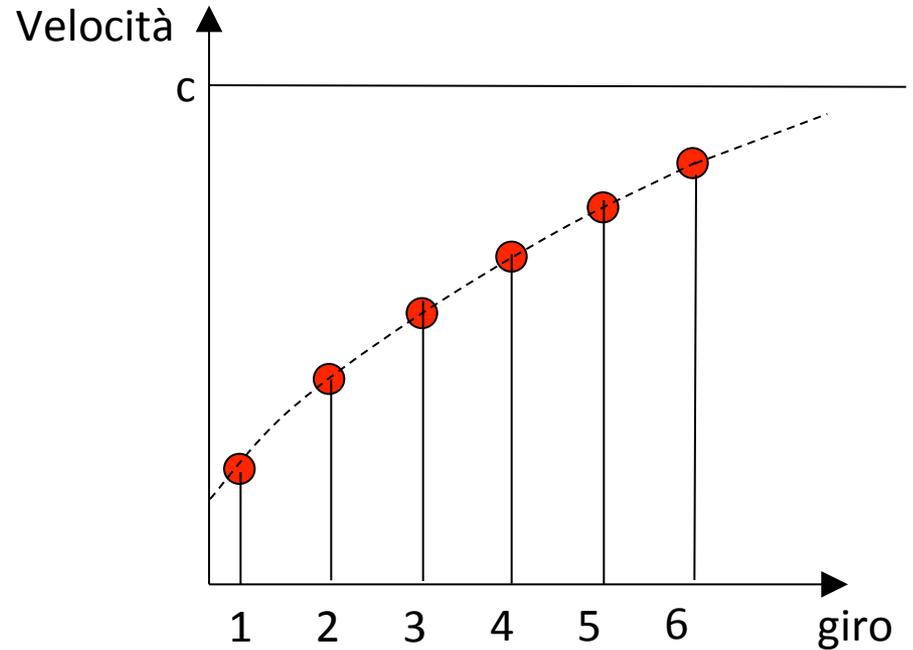
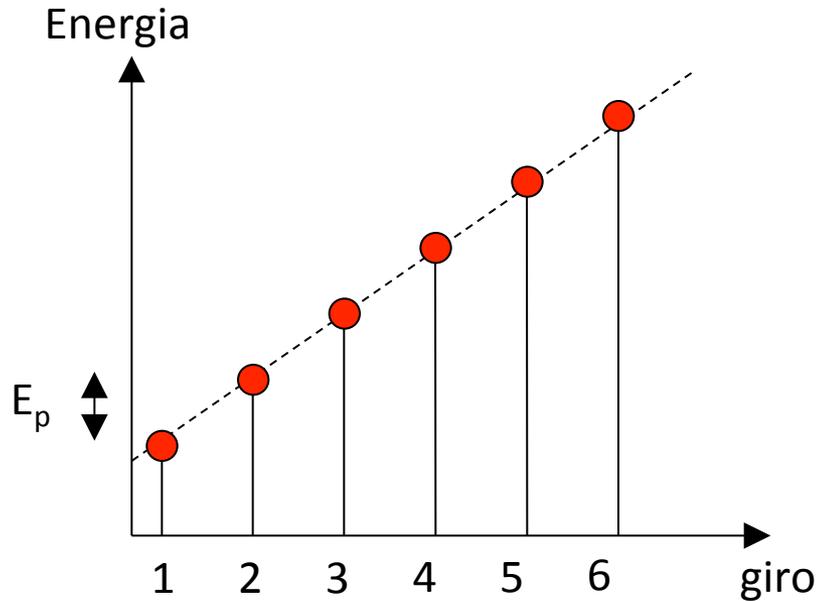


Per avere accelerazione "stabile" ovvero per fare in modo che la particella dopo un giro veda sempre la stessa tensione accelerante in cavità, il periodo di rivoluzione ( $T_{riv}$ ) deve essere un multiplo intero ( $h$ ) del periodo di radiofrequenza ( $T_{RF}$ ) ad ogni giro.

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

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

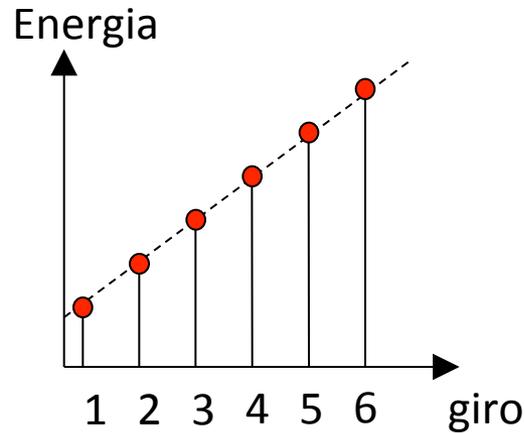
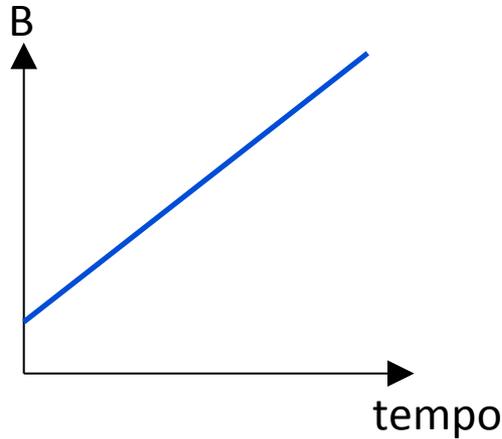
# Accelerazione-energia-velocità



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

# Campo magnetico

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



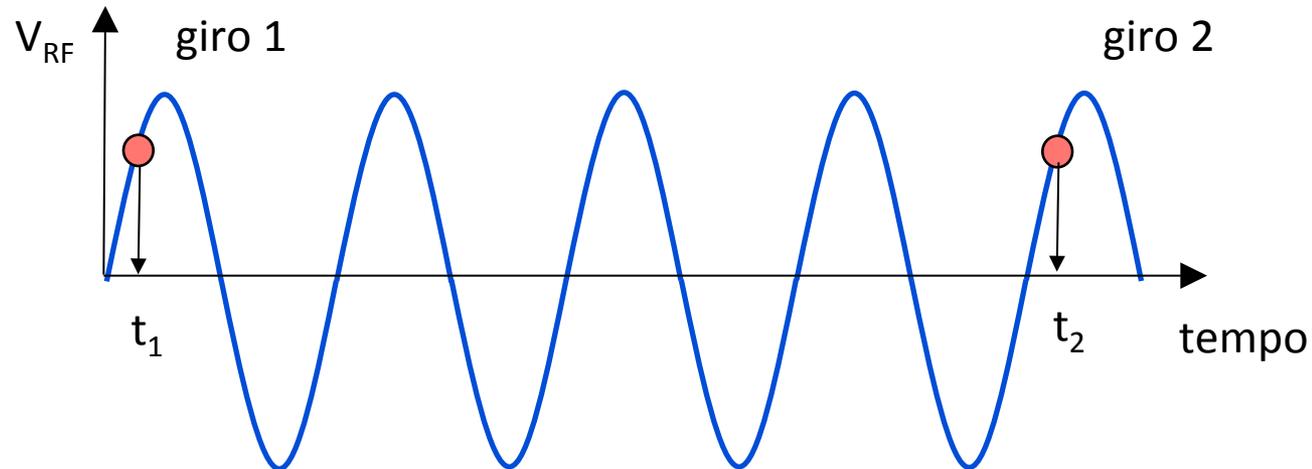
$$R \propto \frac{E_{particella}}{B}$$

Raggio di curvatura

# Particella sincrona

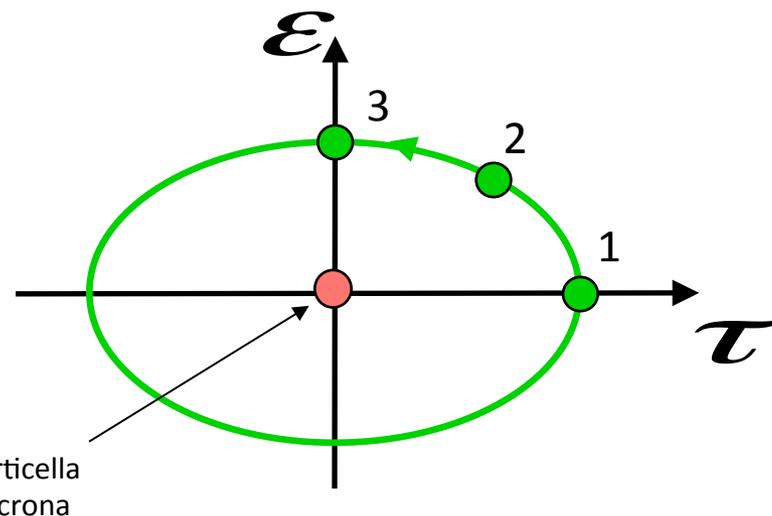
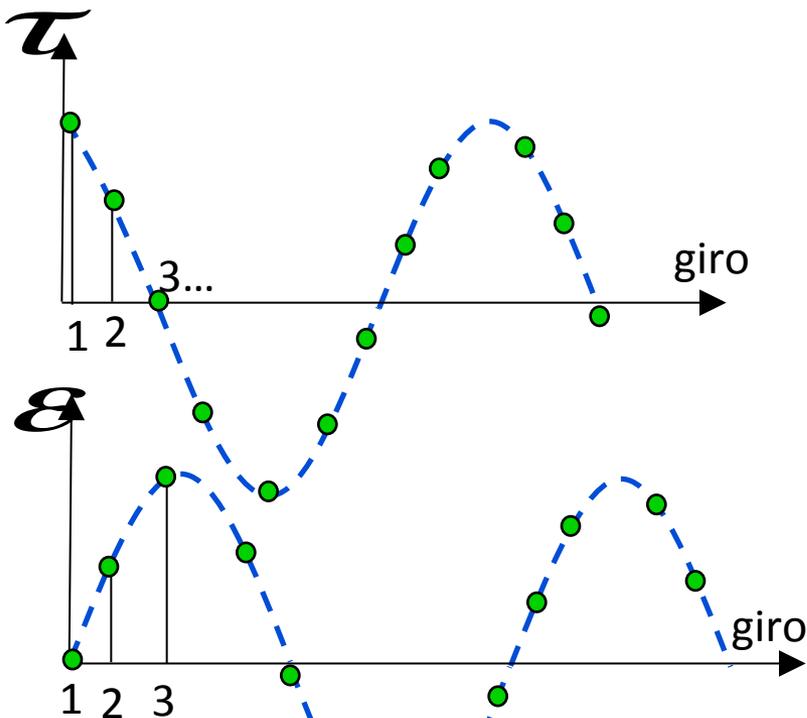
La **particella sincrona** è quella particella che ad ogni giro:

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



# Oscillazioni di sincrotrone

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



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

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

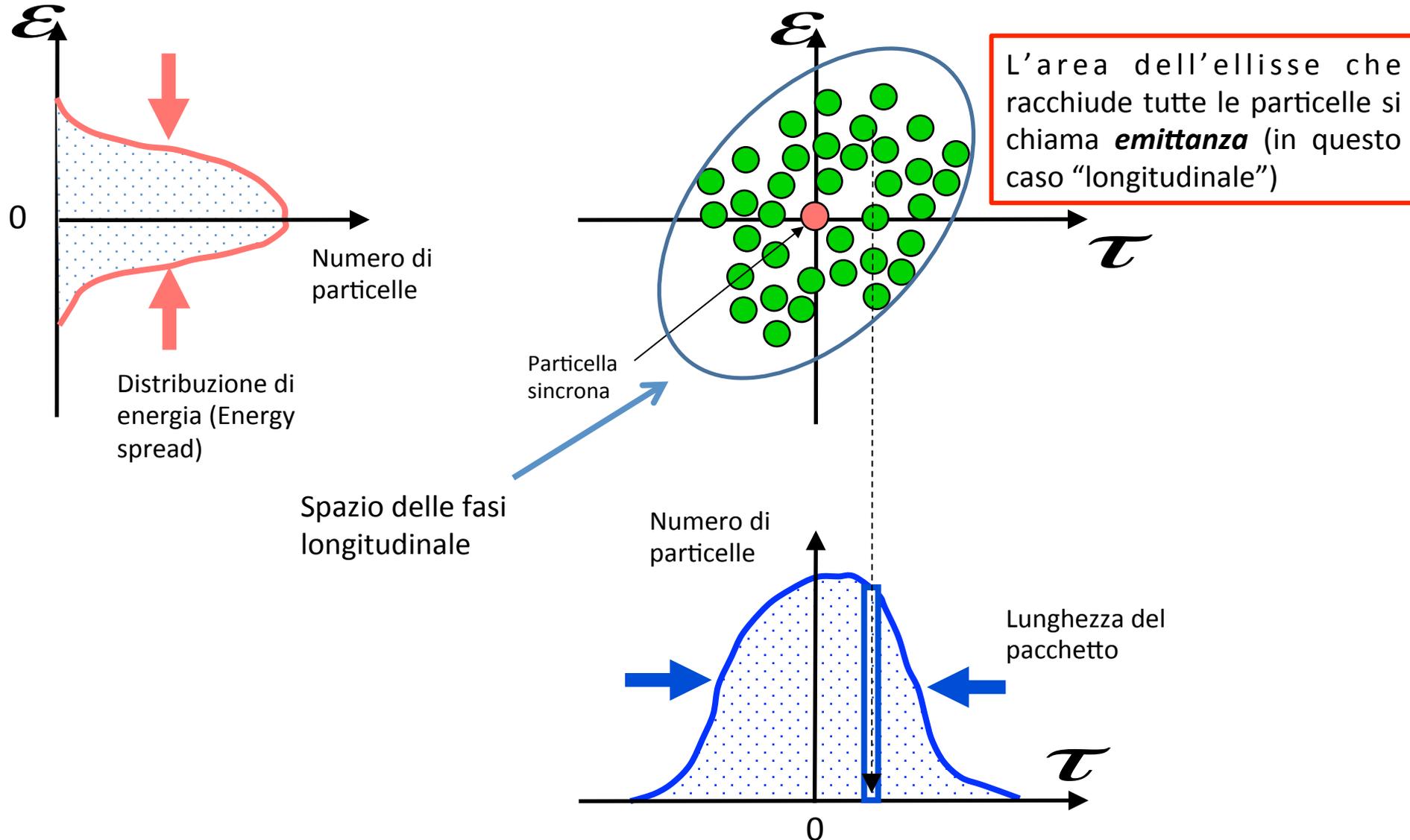
Energia della particella sincrona al giro n

Differenza tra le due energie al giro n

$$E - E_s = \epsilon$$

# Lunghezza del pacchetto di particelle e distribuzione di energia

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

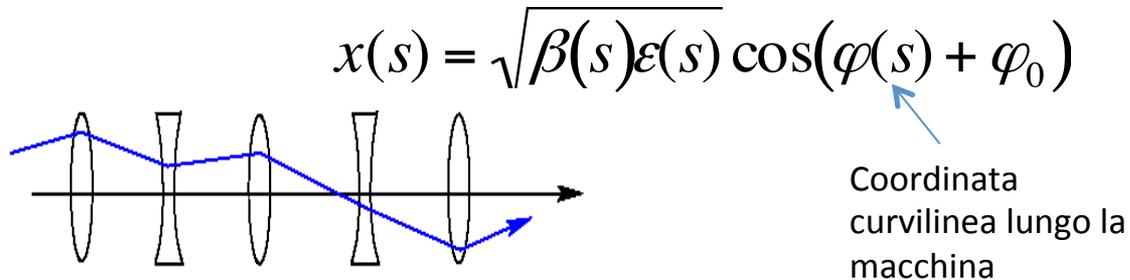


# Dinamica trasversa: oscillazioni di betatrone

Analogamente a quello che accade nel piano longitudinale anche nel *piano trasverso le particelle compiono delle oscillazioni* (dette oscillazioni di **betatrone**) causate dalla forza di richiamo esercitata dai quadrupoli.

L'oscillazione della singola particella è descrivibile come:

s

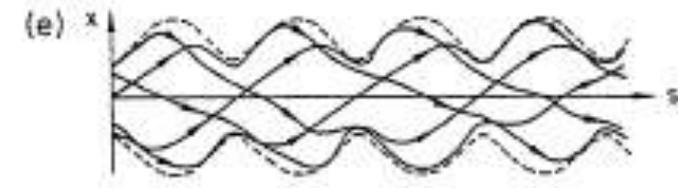
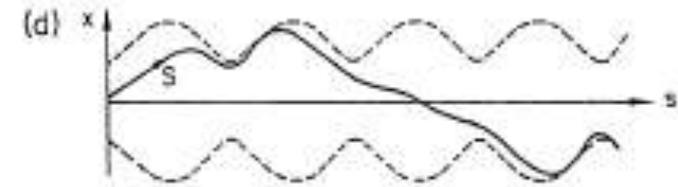
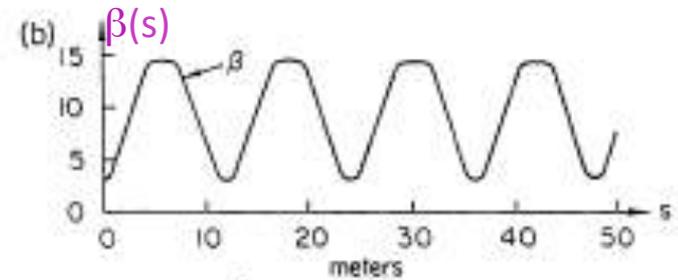


## Le oscillazioni di betatrone:

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

La **funzione  $\beta$**  è:

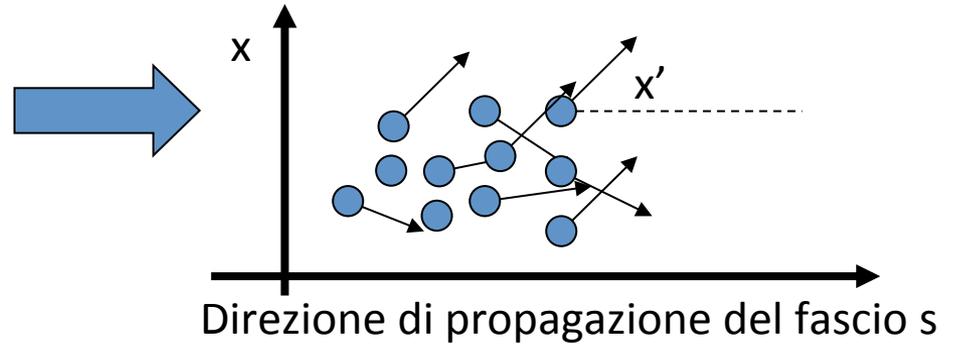
- sempre positiva
- misurata in metri
- periodica in s ossia riassume gli stessi valori ad ogni giro
- ha un massimo nei QF un minimo nei QD
- descrive globalmente l'effetto dei campi magnetici nell'anello



Tutte le traiettorie stabili sono comprese entro l'involuppo

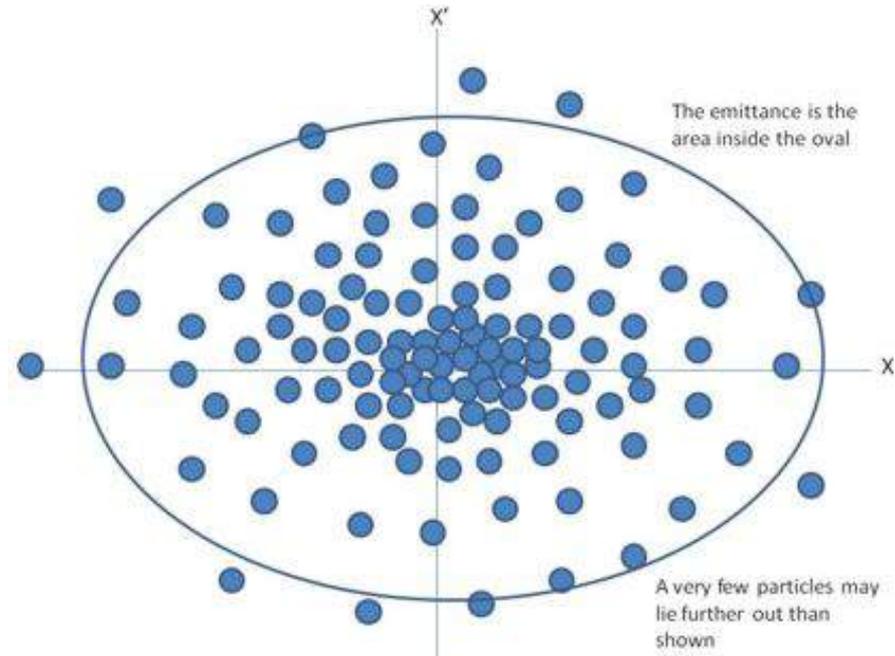
# Spazio delle fasi ed emittanza

Le particelle di un fascio in un acceleratore *non hanno* tutte la stessa energia, posizione, divergenza.



Ogni piano del tipo  $(x, x')$  oppure  $(y, y')$  viene detto **SPAZIO DELLE FASI**

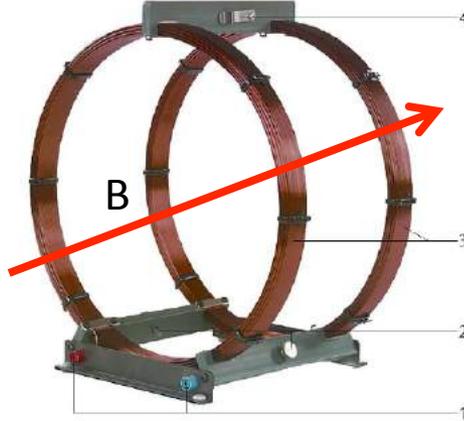
L'area occupata dalle particelle in ogni spazio delle fasi è detta **EMITTANZA**



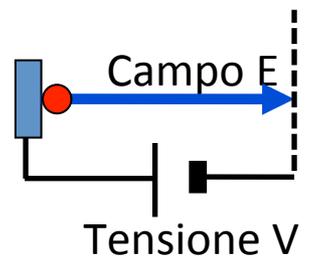
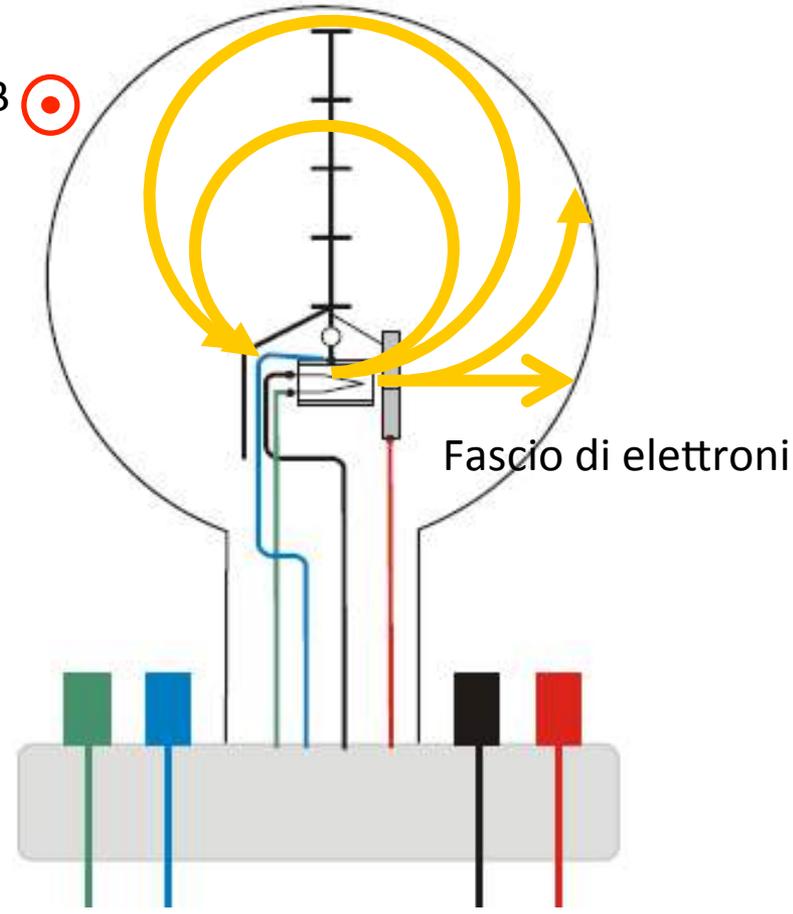
# ESPERIMENTO CON TUBO CATODICO: DESCRIZIONE



Cannone elettronico



B



Tensione V

# ESPERIMENTO CON TUBO CATODICO: CALCOLI

$$\Delta V = 300V$$

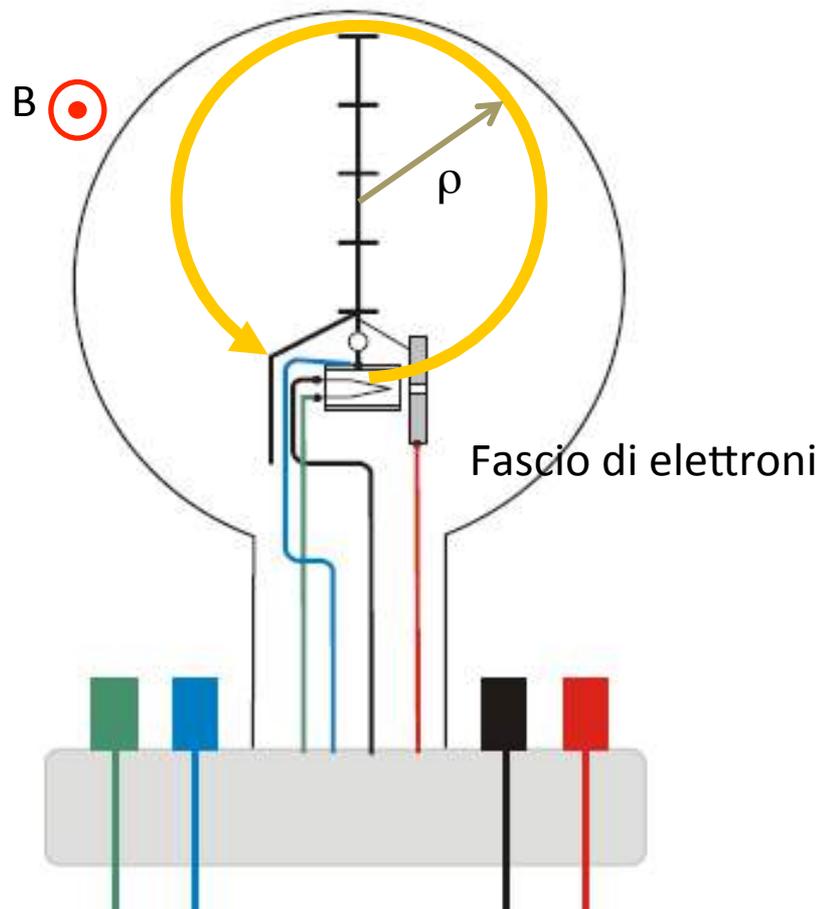
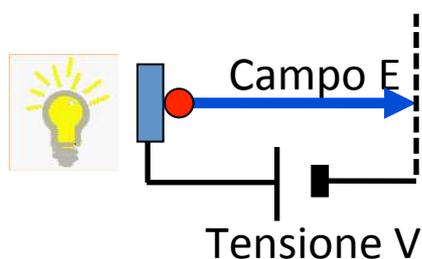
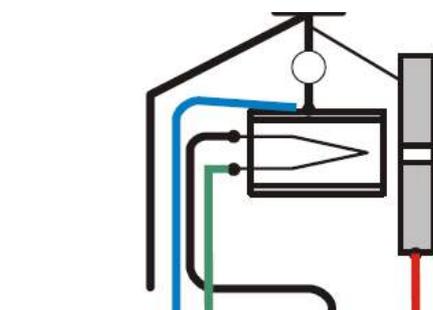
Accelerazione

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

$$\beta = 0.034$$

Deflessione

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



$$m = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

$$e = 9.1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

# Gli acceleratori di particelle parte II

*David Alesini*

*Divisione Acceleratori*

*LNF-INFN*



# IN BREVE: COME SI ACCELERANO LE PARTICELLE

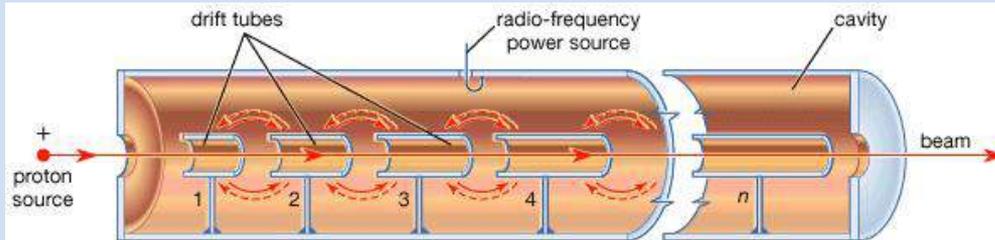
$\vec{p}$  = momentum

$\vec{v}$  = velocity

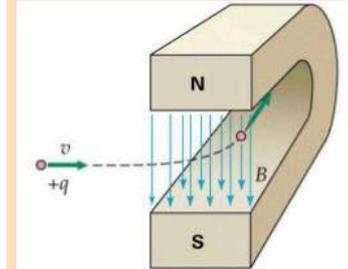
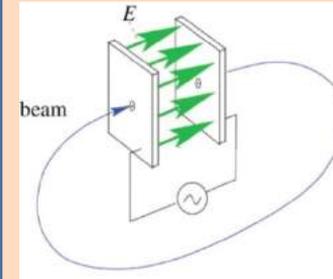
$q$  = charge

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

## LINEARI



## CIRCOLARI



### Fermilab Accelerator Complex



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

## Visible light

$\lambda = 400 \rightarrow 700 \text{ nm}$



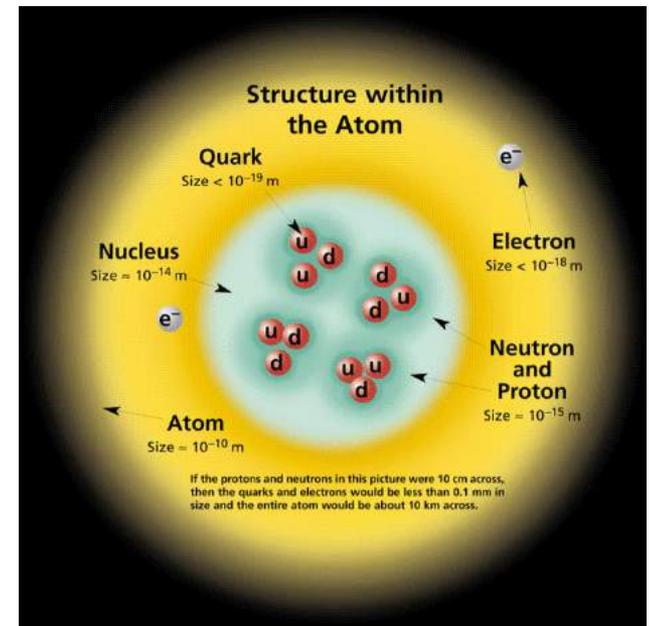
## X-ray

$\lambda = 0.01 \rightarrow 10 \text{ nm}$



## Particle accelerators

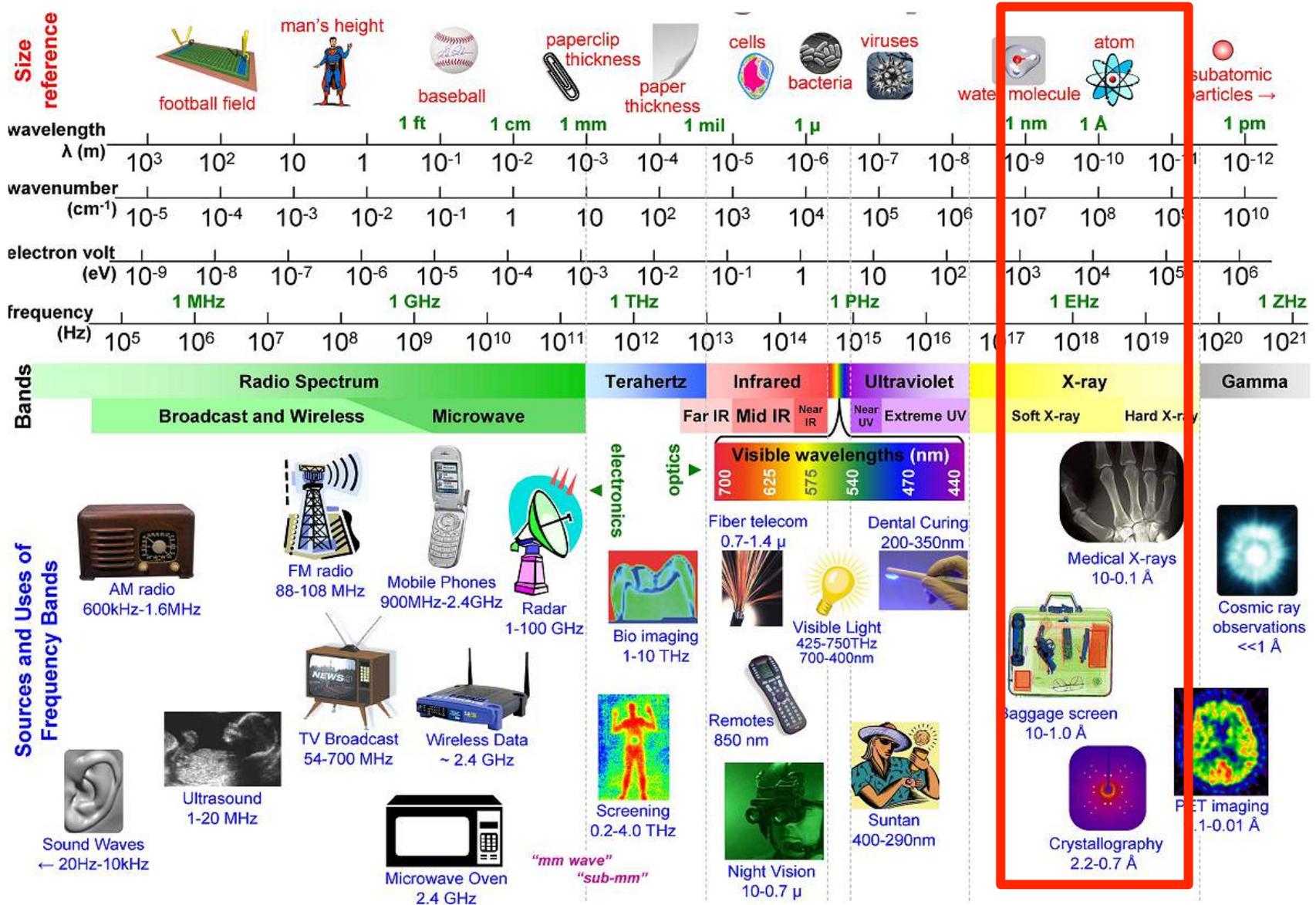
$\lambda < 0.01 \text{ nm}$



$$\lambda = \frac{h c}{E}$$

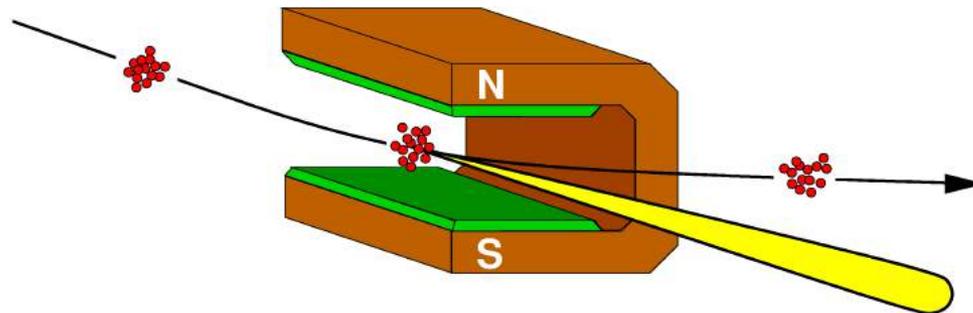
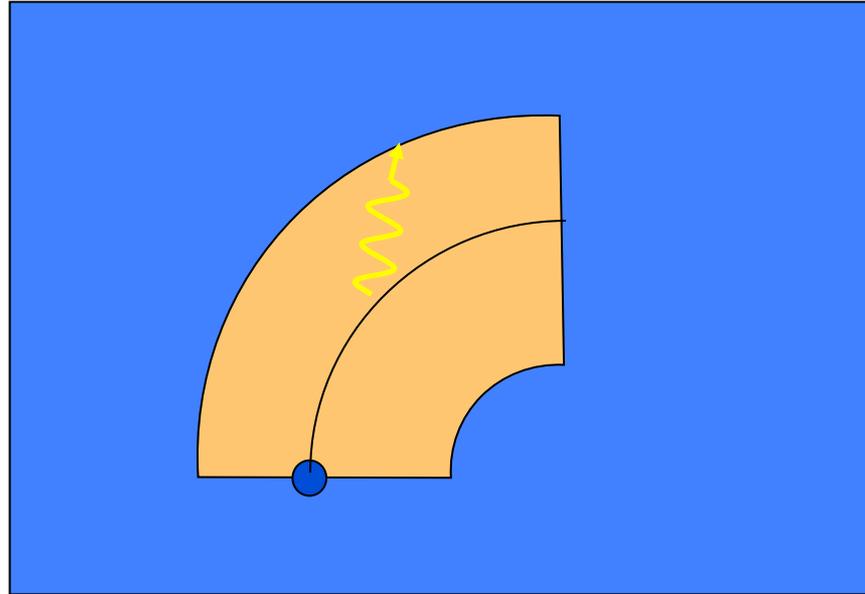
Increasing the energy will reduce the wavelength

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



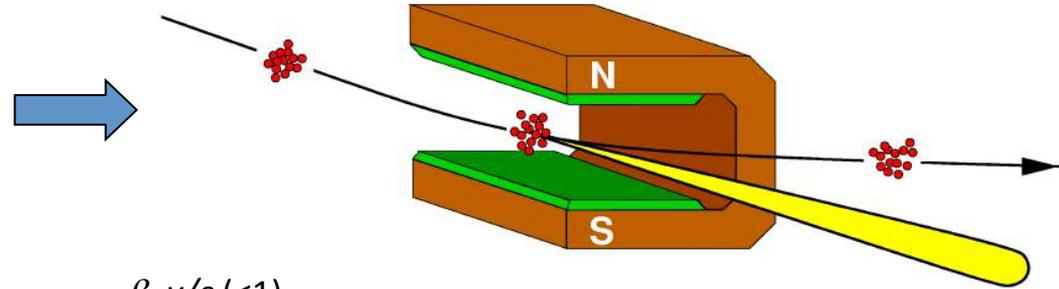
# EMISSIONE DI LUCE DA PARTICELLE CARICHE ACCELERATE

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



# EMISSIONE DI LUCE DA PARTICELLE CARICHE ACCELERATE

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

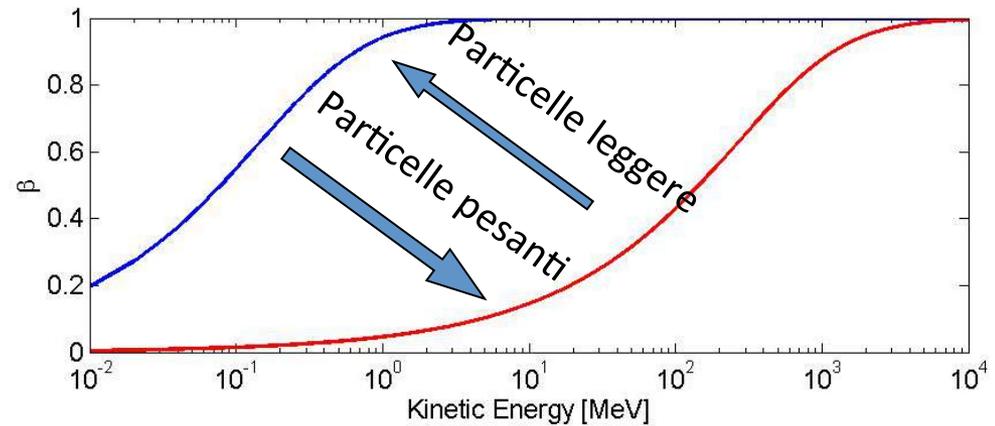


$$\beta = v/c (<1)$$

$$\gamma = E/E_0 (>1)$$

Tale fenomeno è tanto più accentuato quanto più la particella è relativistica ( $\gamma = E/E_0$ ) ovvero si muove a **velocità prossime a quella della luce**.

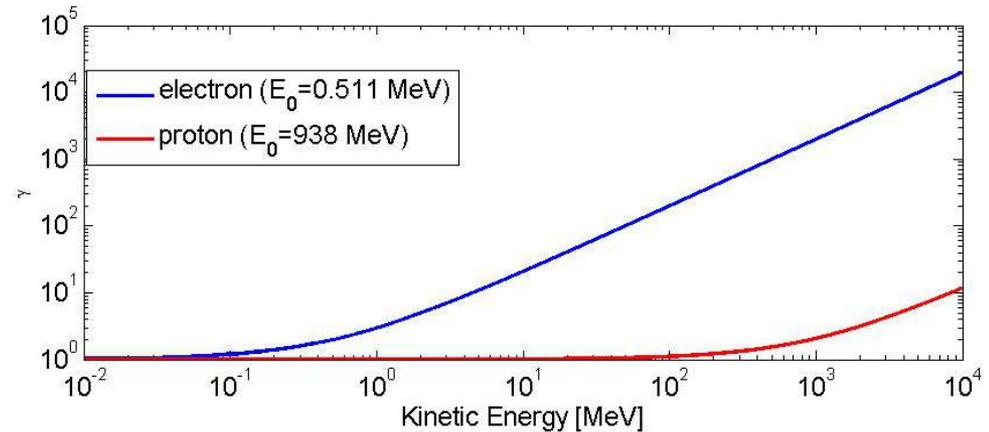
Ne consegue che **solo le macchine ad elettroni** (particelle leggere) emettono fotoni (eccetto LHC!).



**Energia irradiata in un giro da una particella**

**Energia della particella**

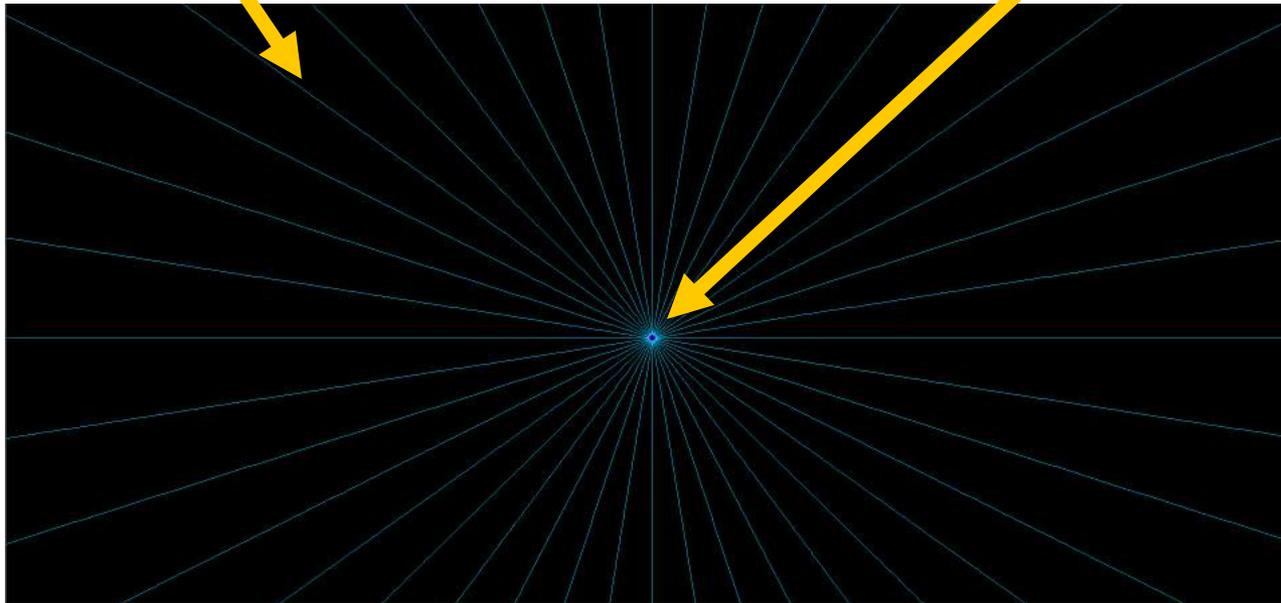
$$U_{\text{per giro}} = \frac{4\pi}{3} \frac{r_e}{(m_0 c^2)^3} \frac{E^4}{\rho} = \frac{e^2}{3\epsilon_0} \frac{\gamma^4}{\rho}$$



# RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE

Campo elettrico

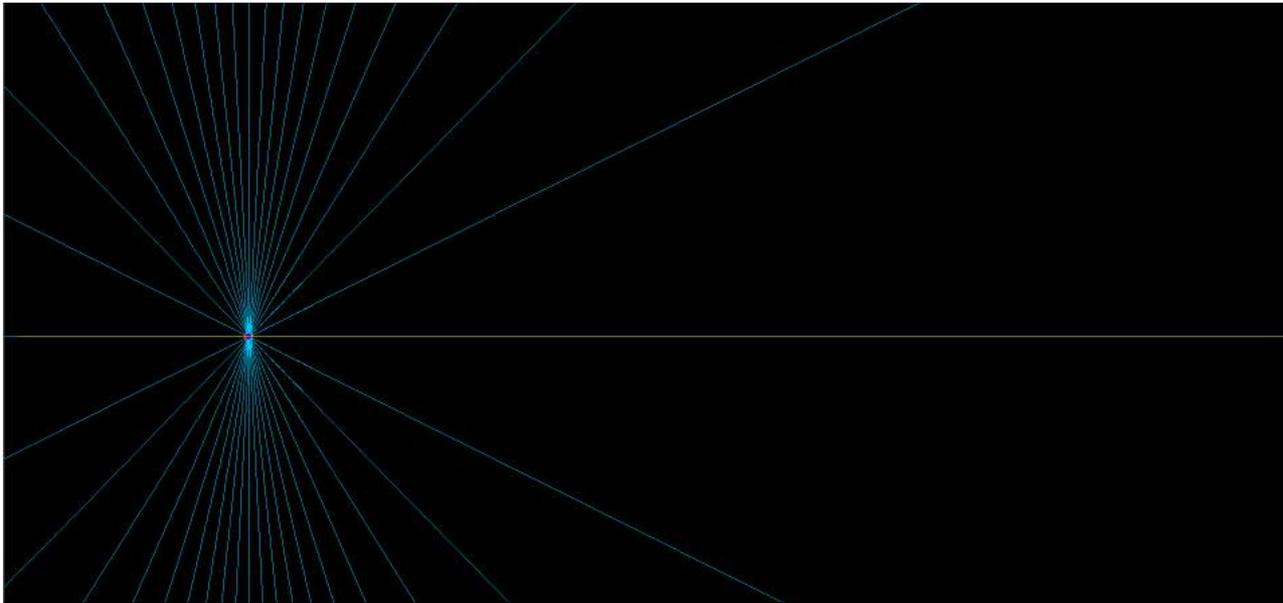
Carica ferma



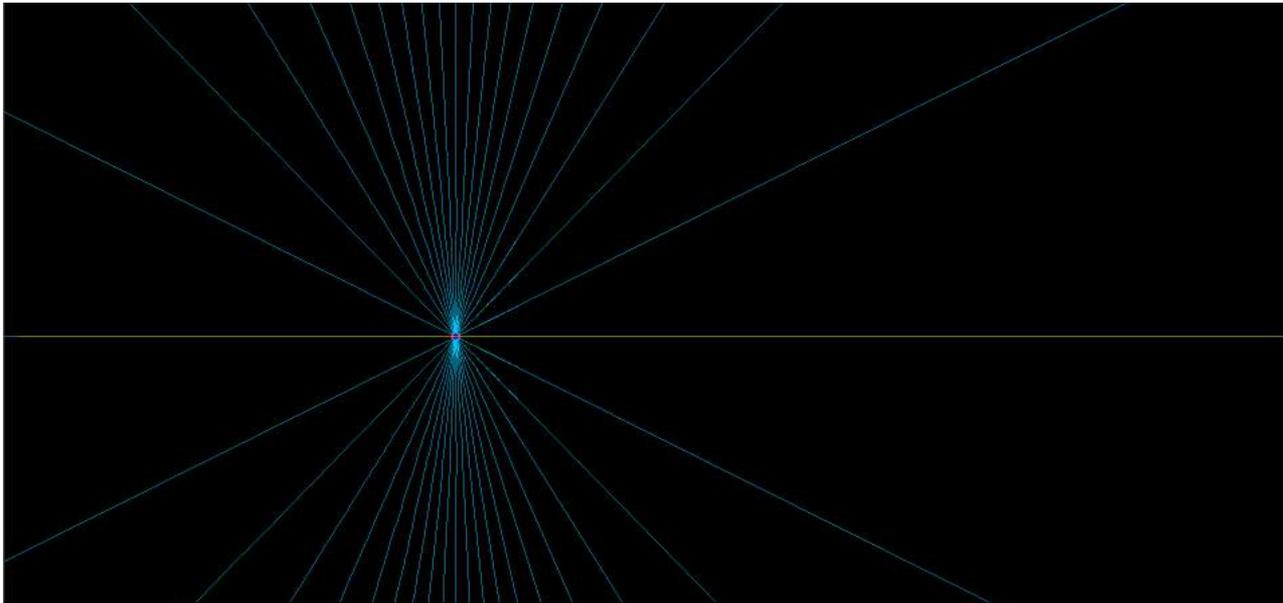
# RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE



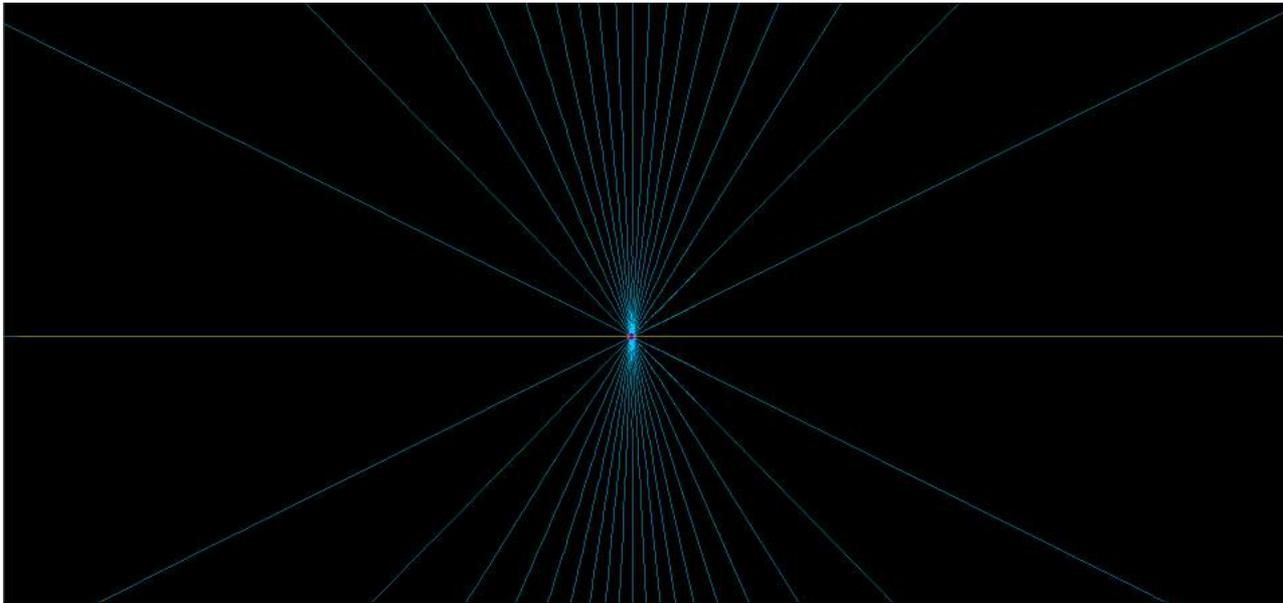
# RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE



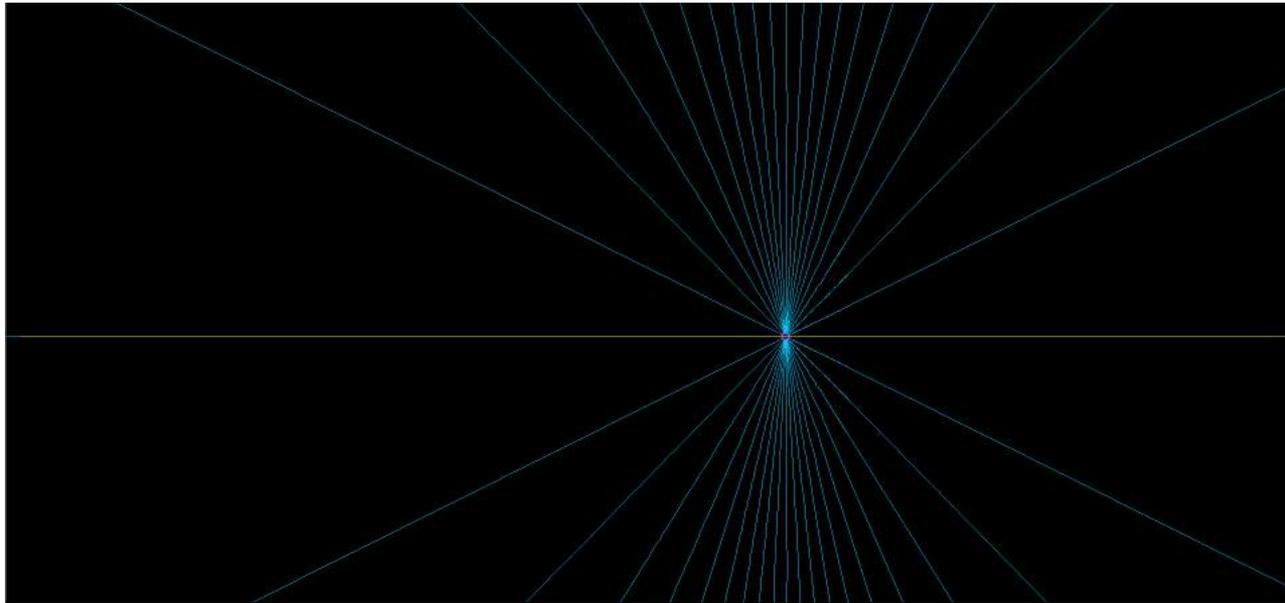
# RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE



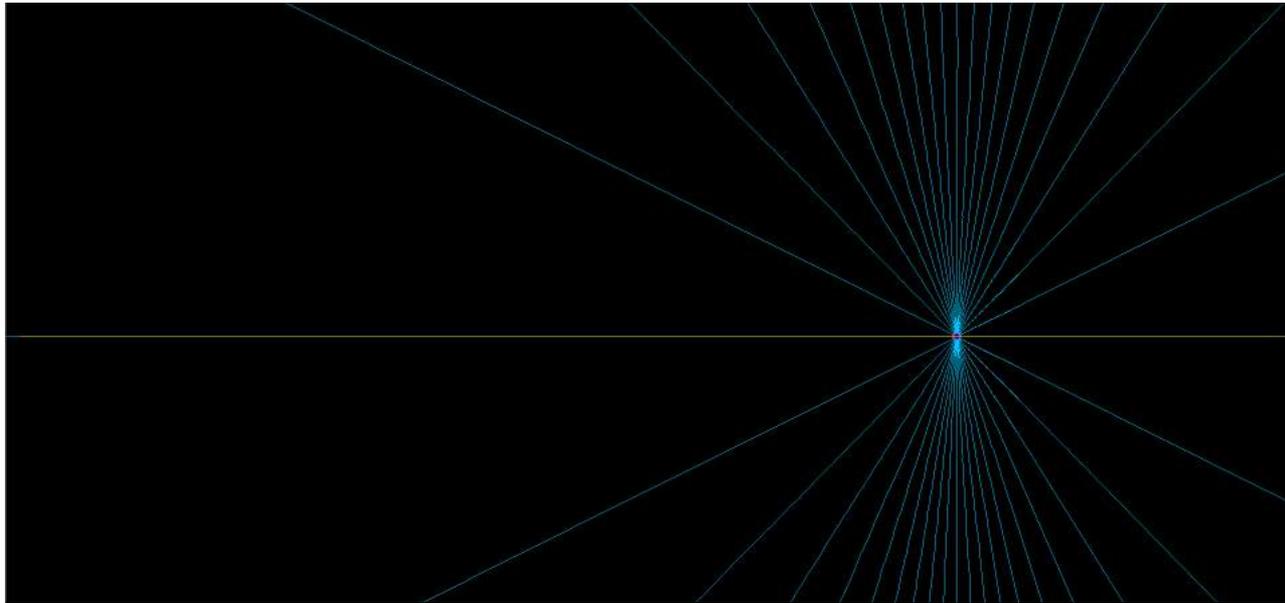
# RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE



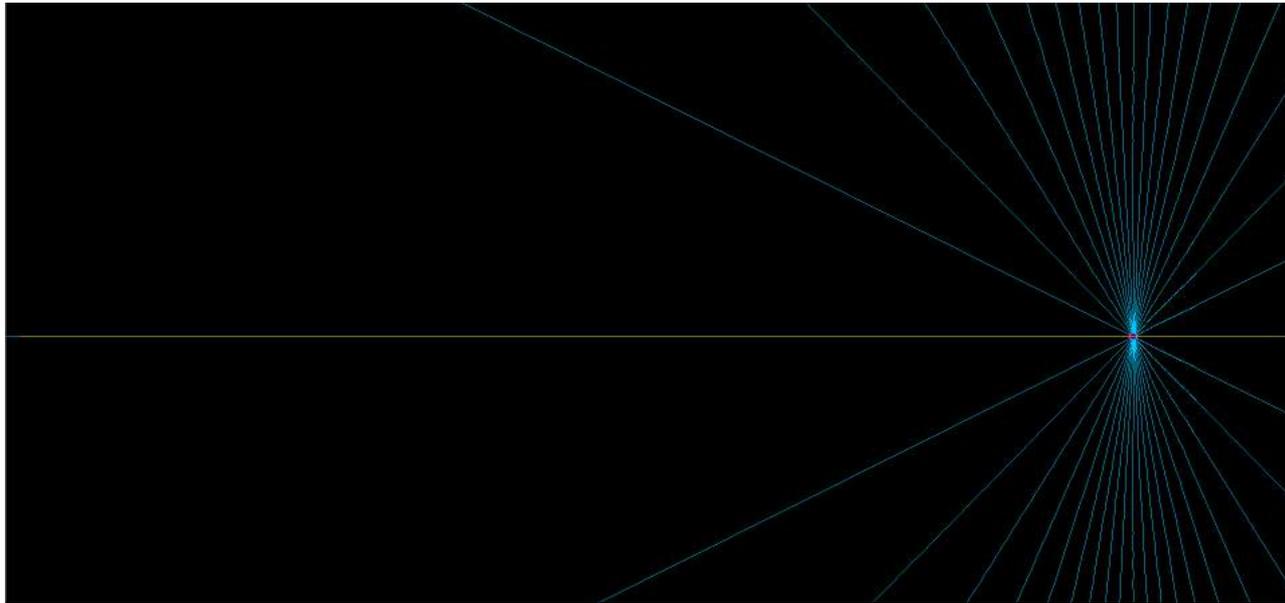
# RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE



# RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE



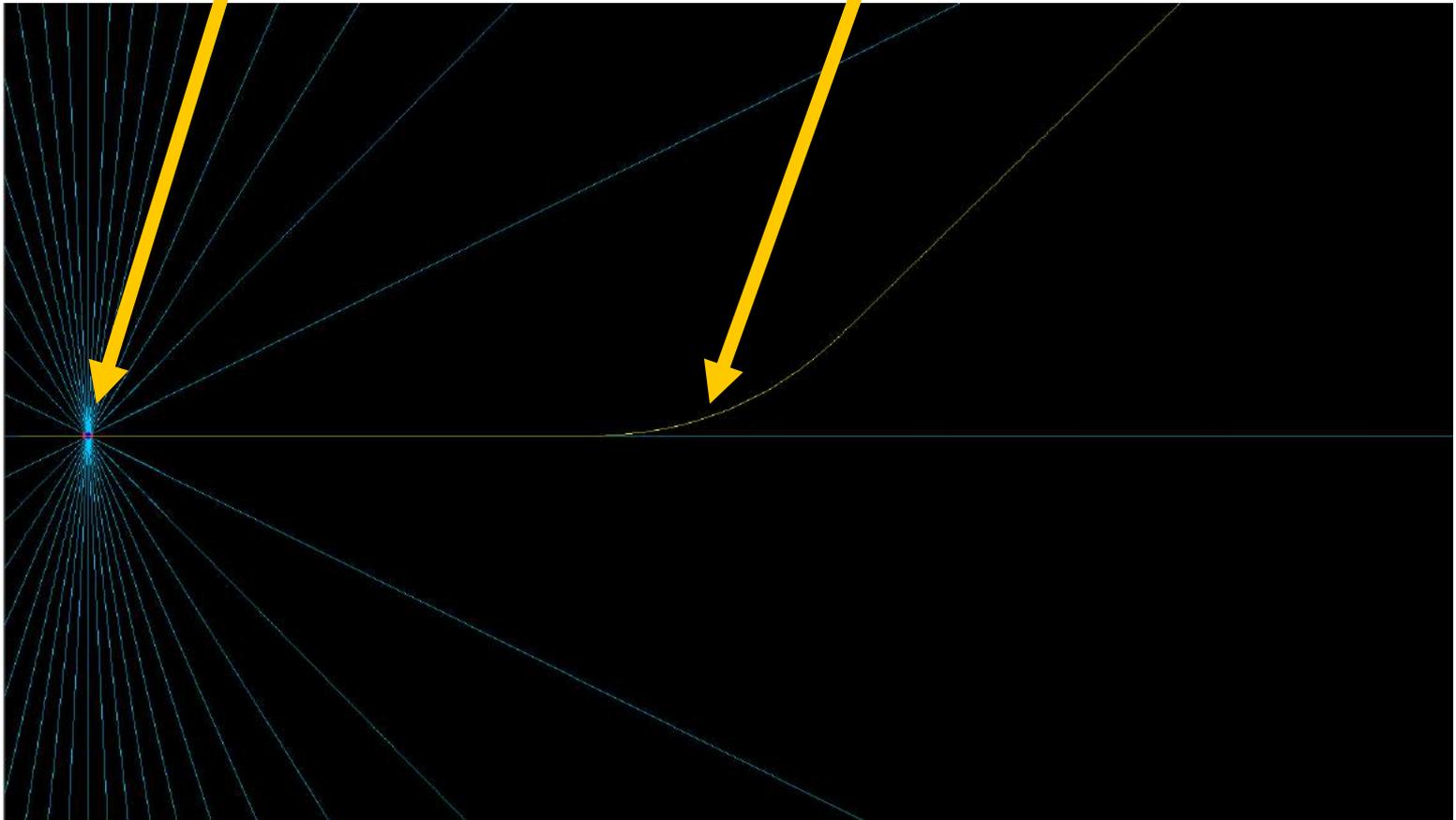
# RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE



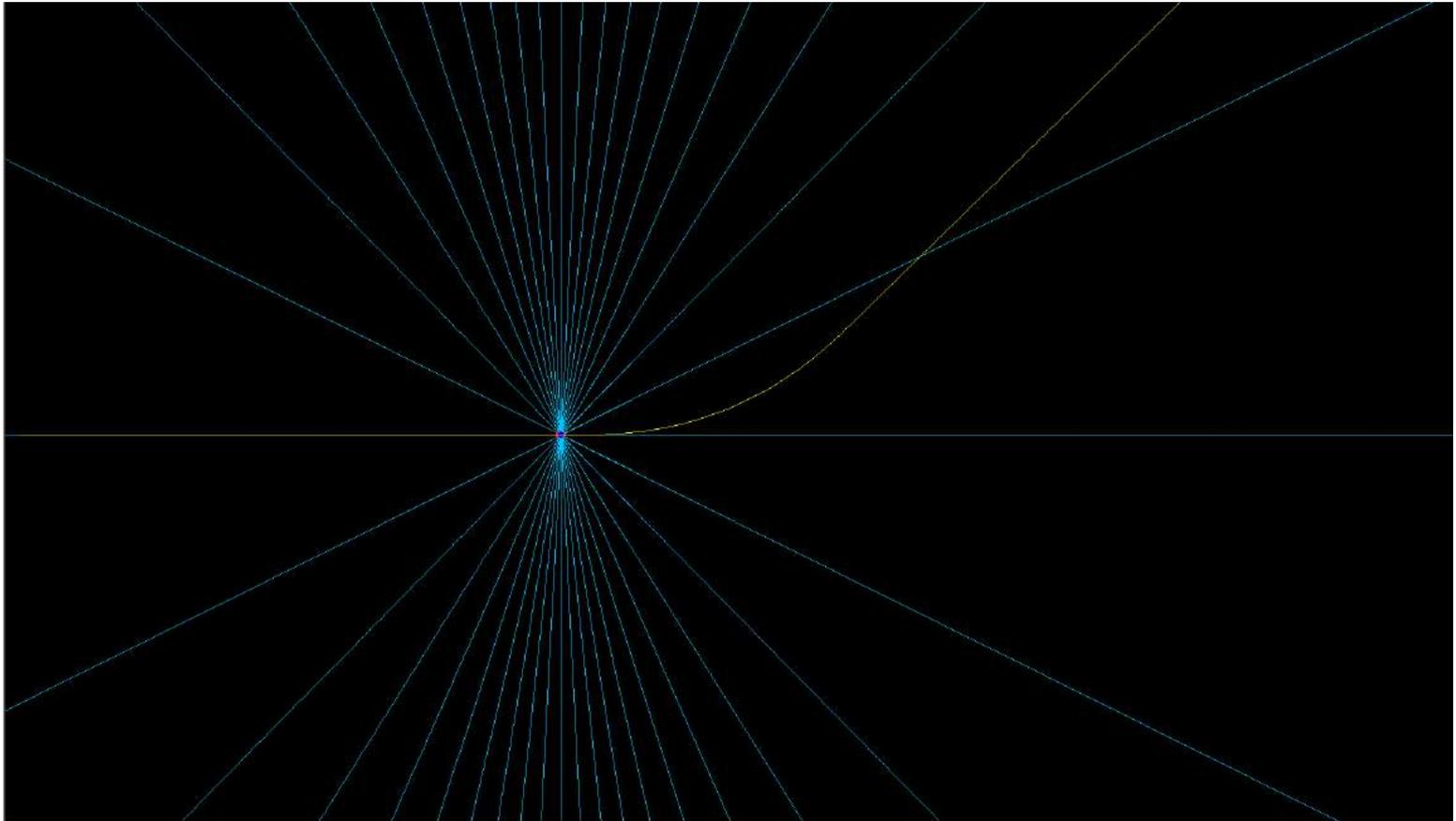
# RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: DIPOLO

Carica in movimento

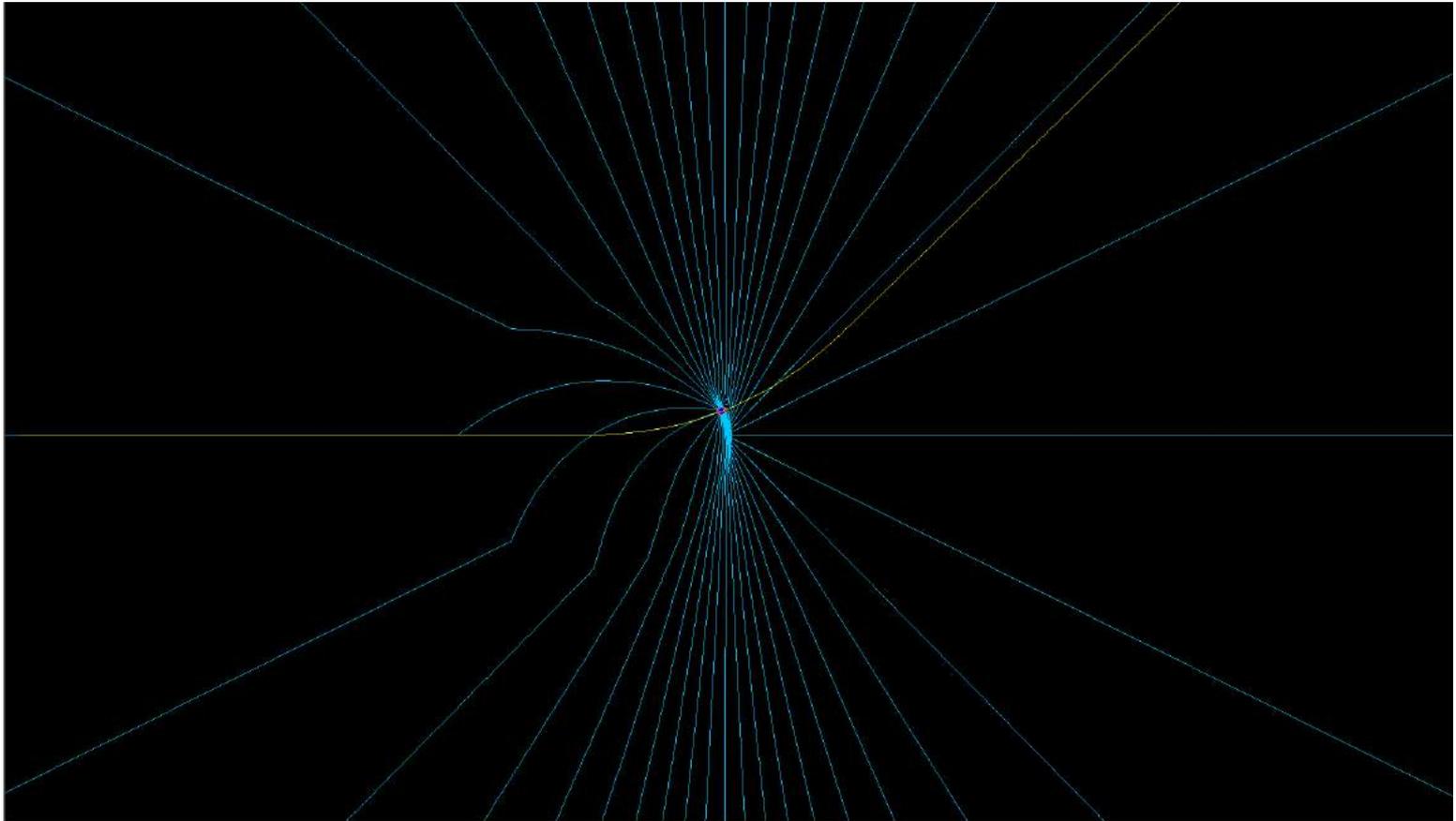
Traiettoria  
generata da un  
dipolo



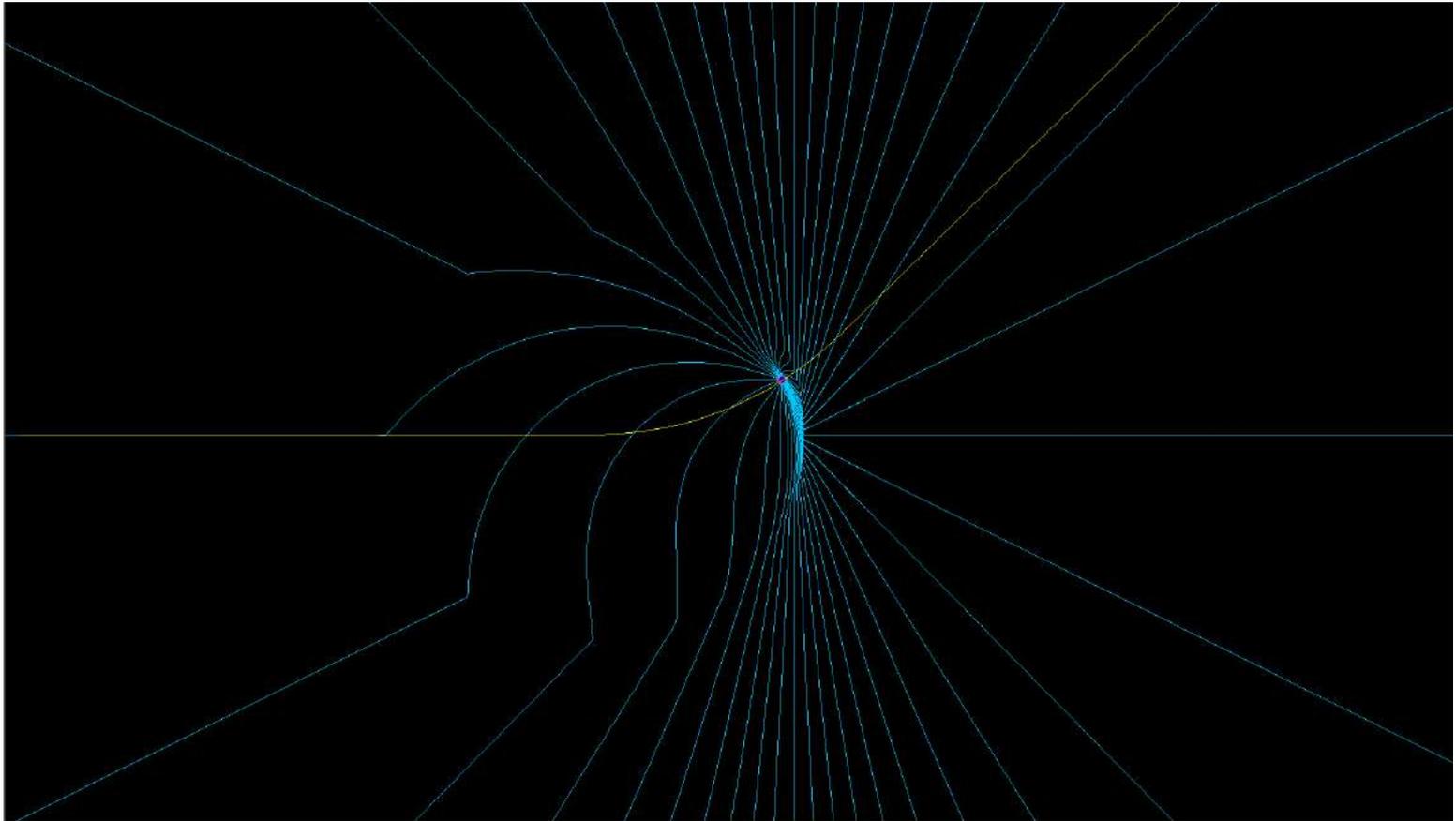
# RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: DIPOLO



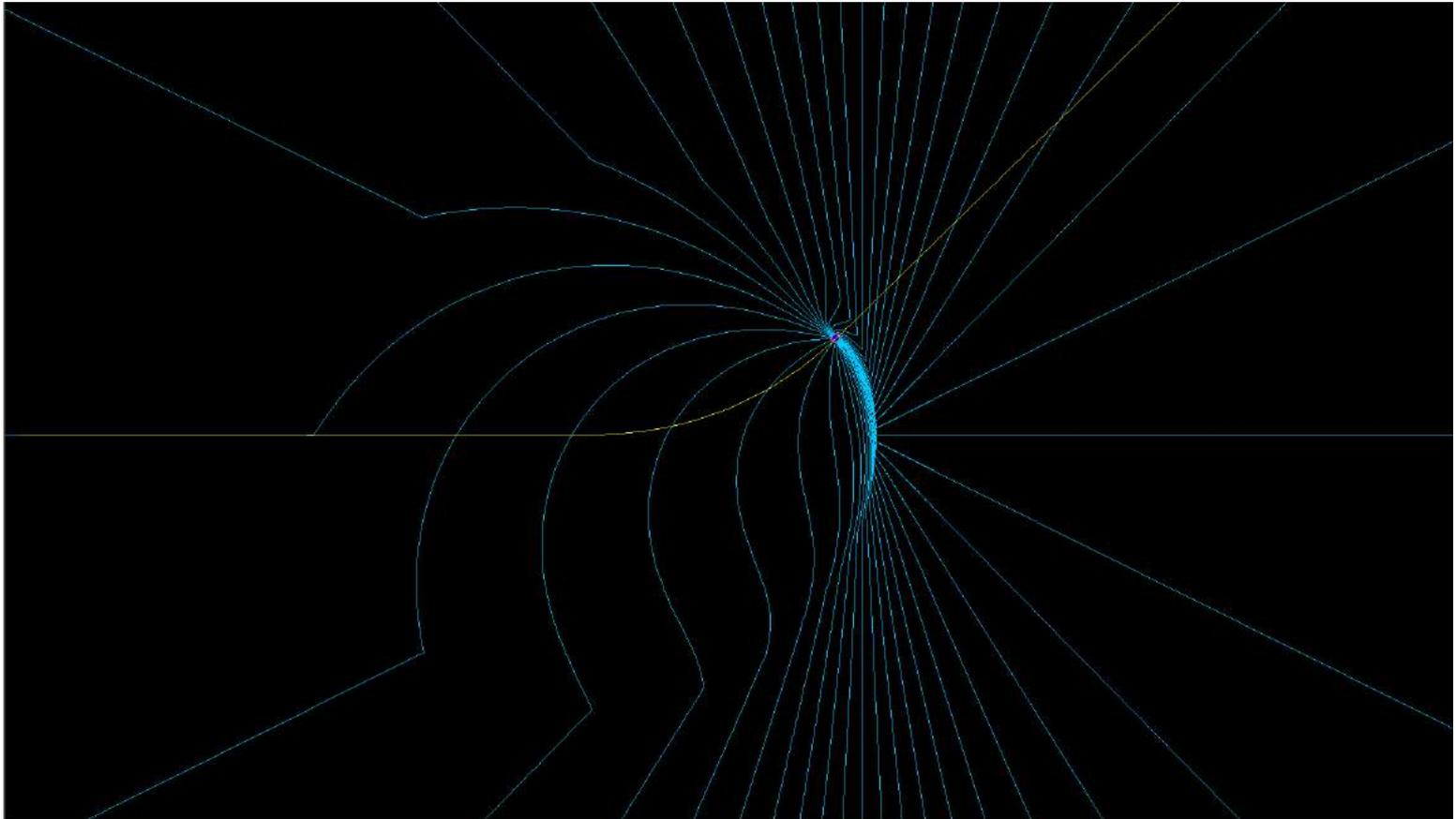
# RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: DIPOLO



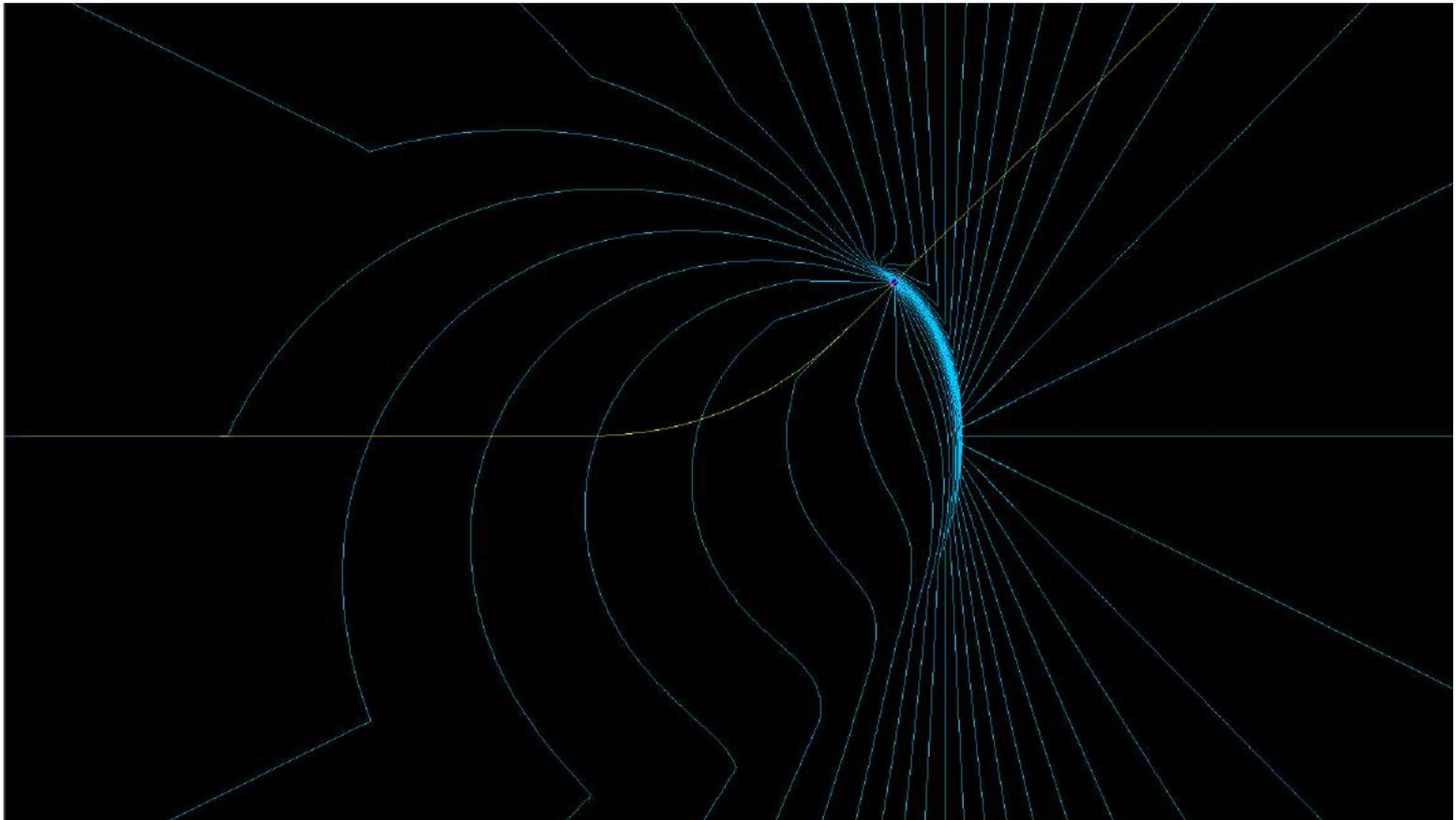
# RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: DIPOLO



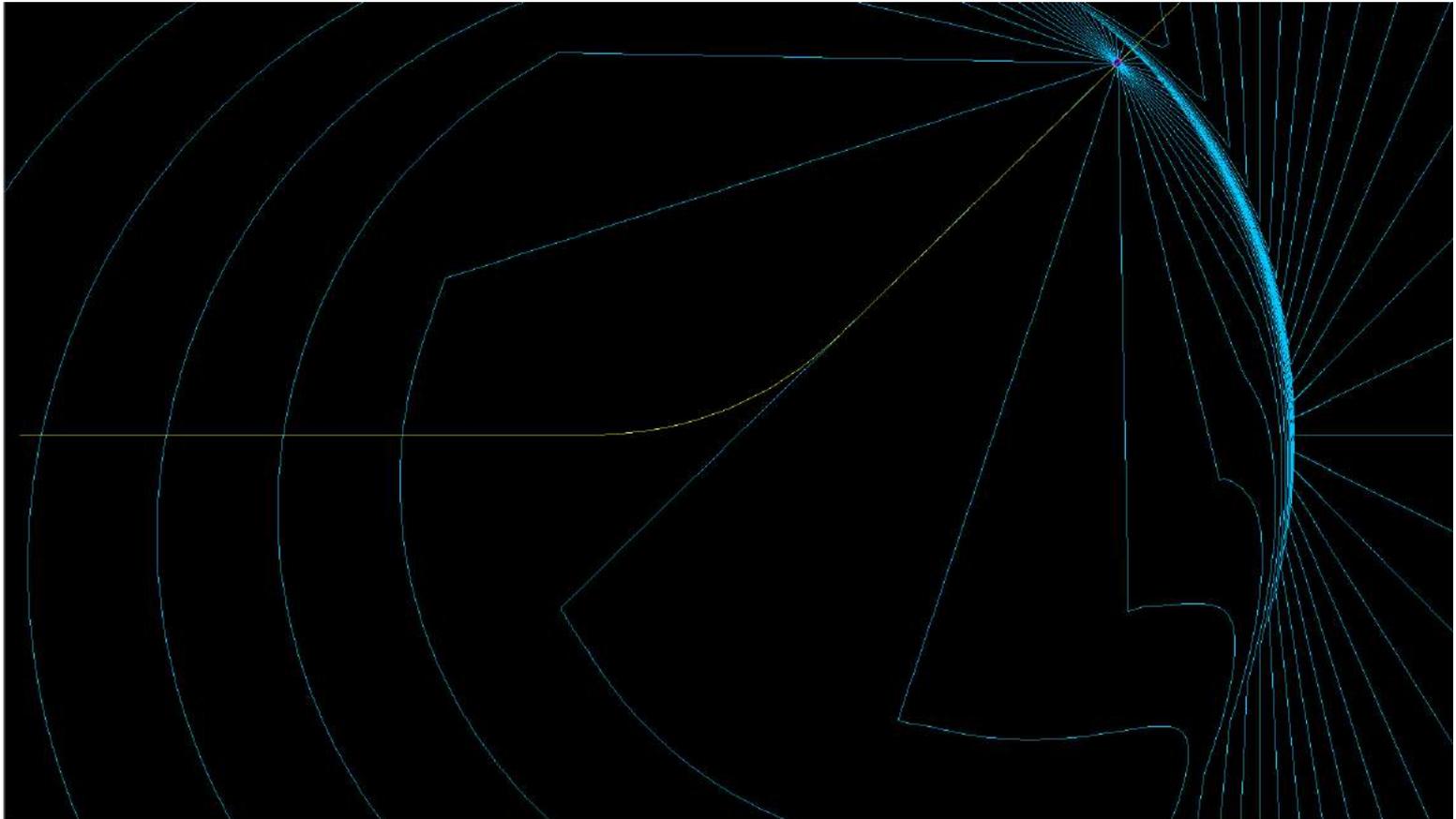
# RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: DIPOLO



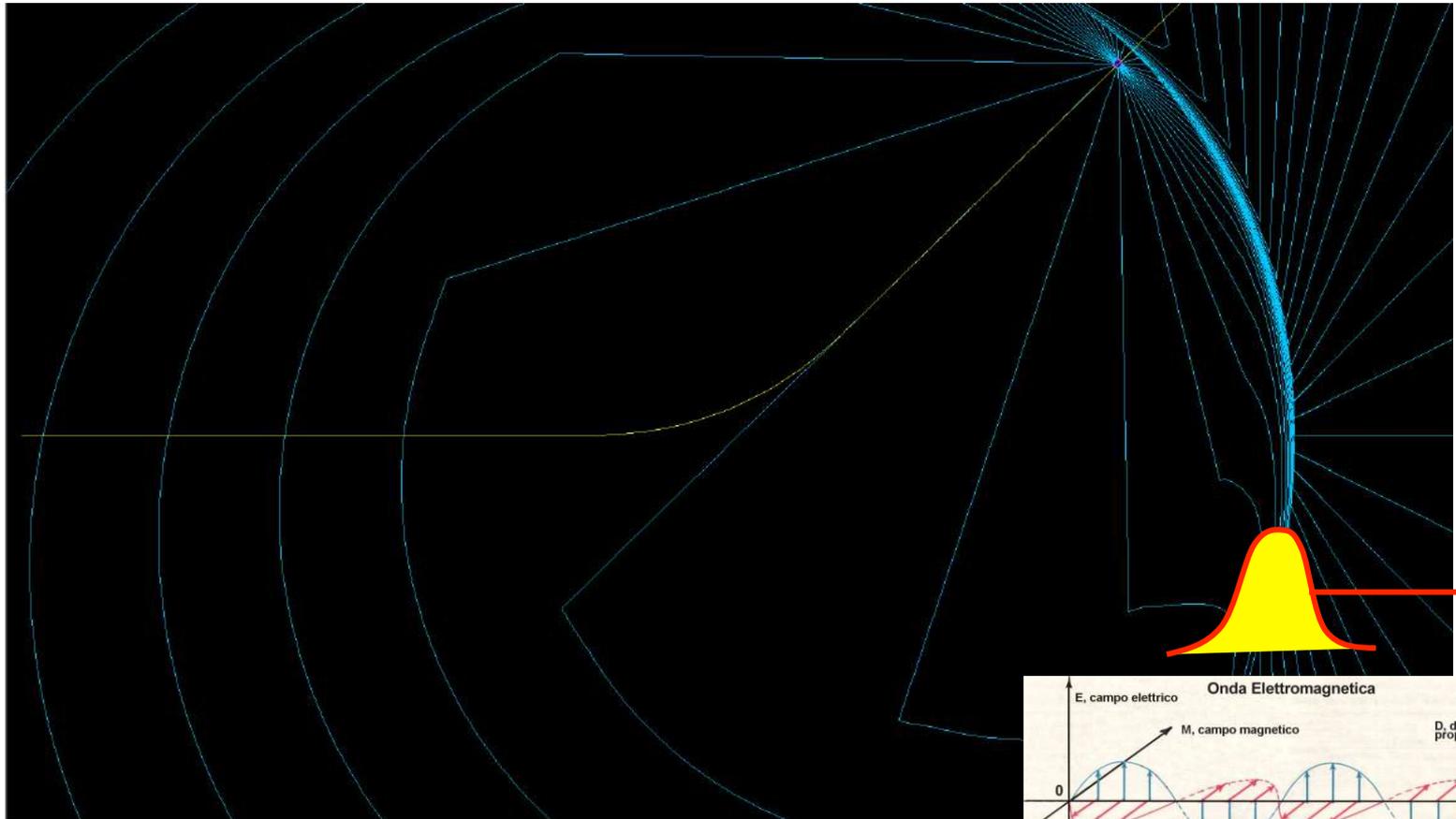
# RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: DIPOLO



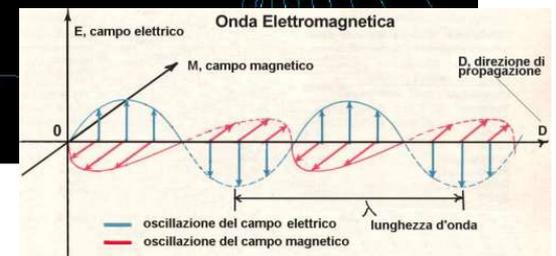
# RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: DIPOLO



# RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: DIPOLO



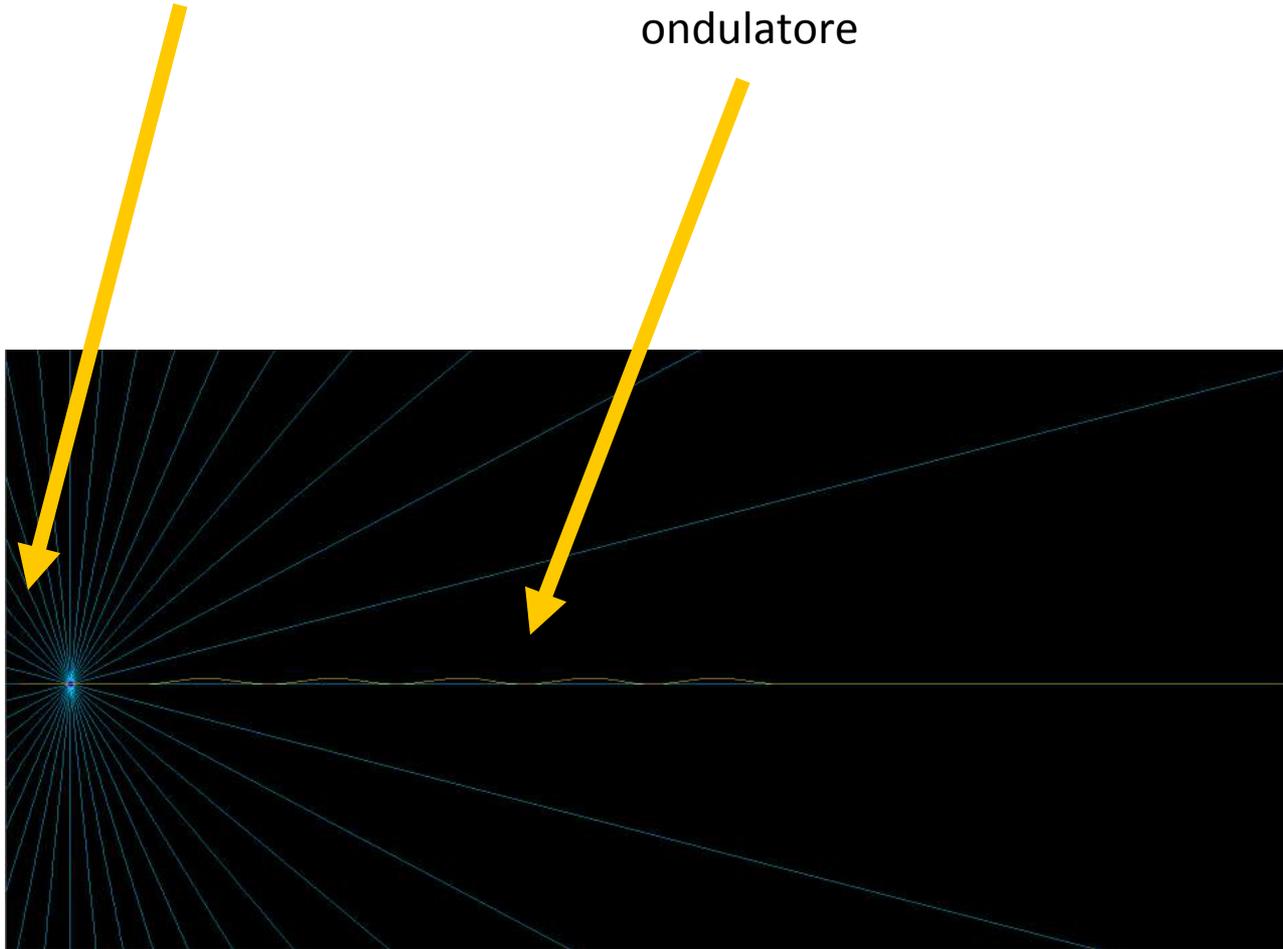
Onda piana



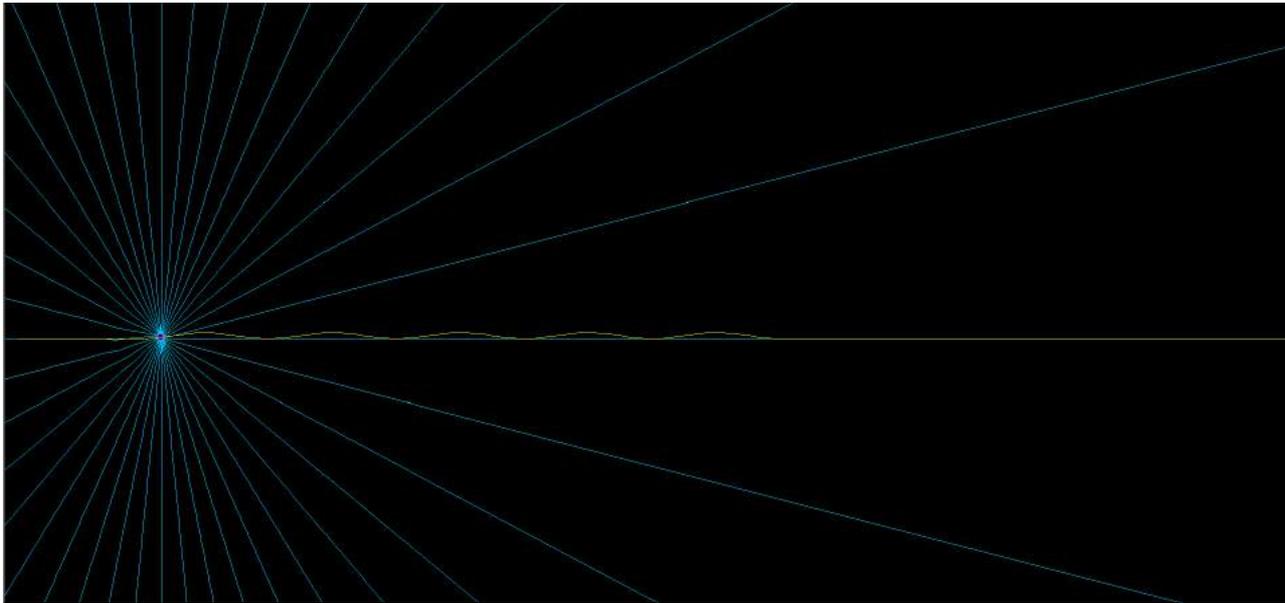
# RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: ONDULATORE

Carica in movimento

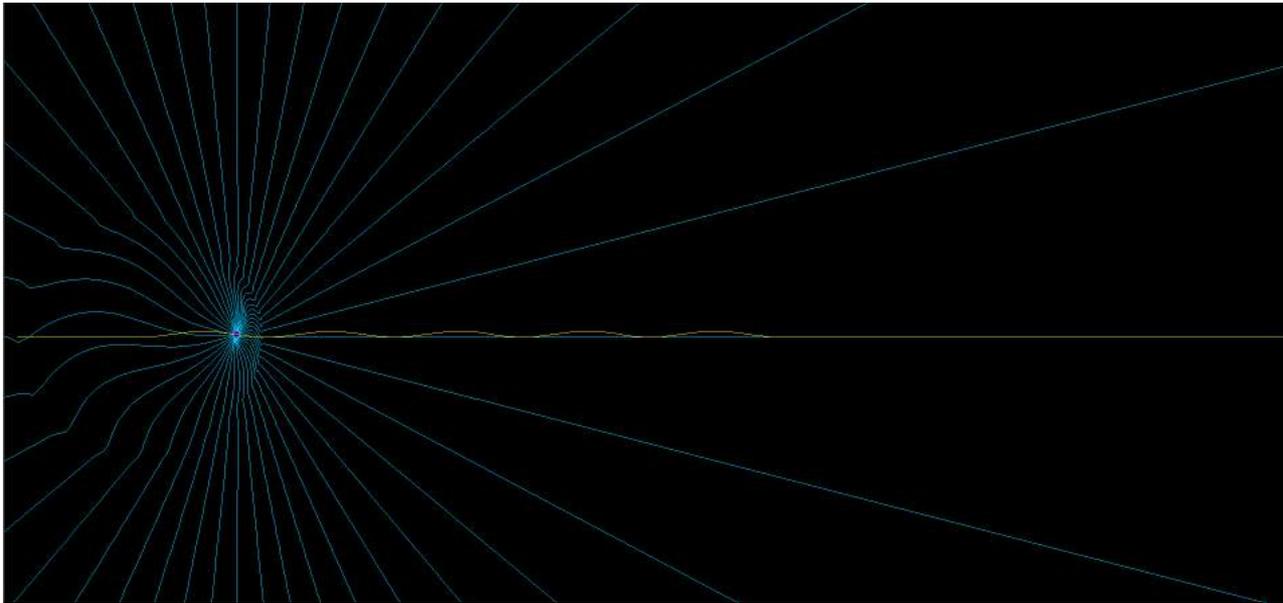
Traiettoria in un  
ondulatore



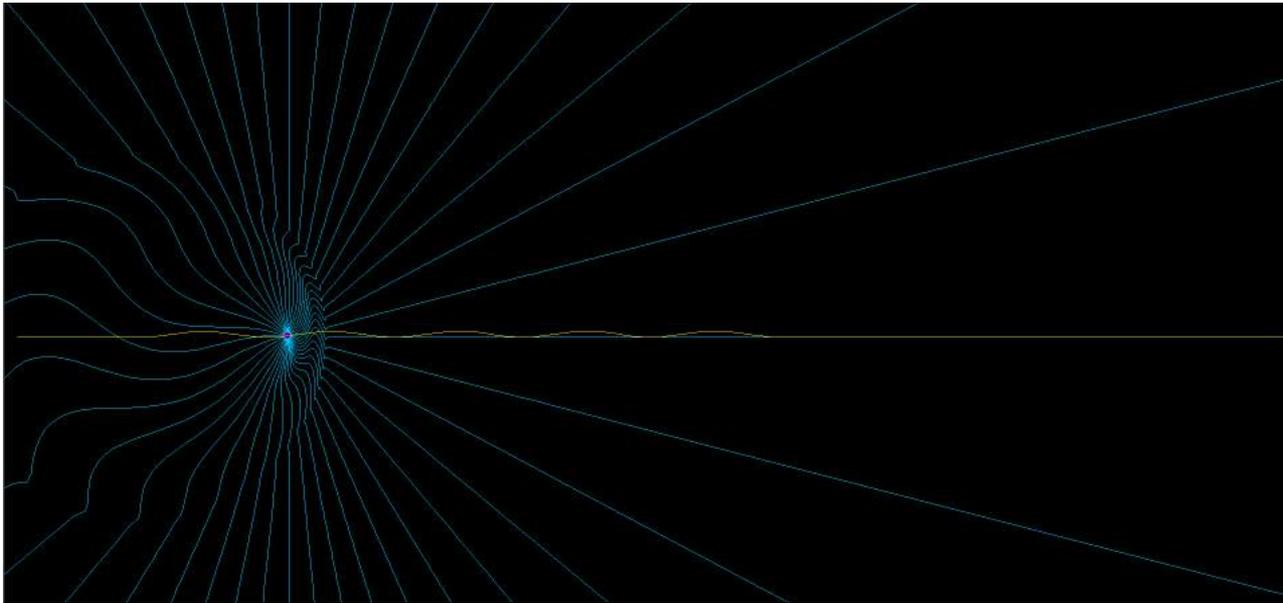
# RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: DIPOLO



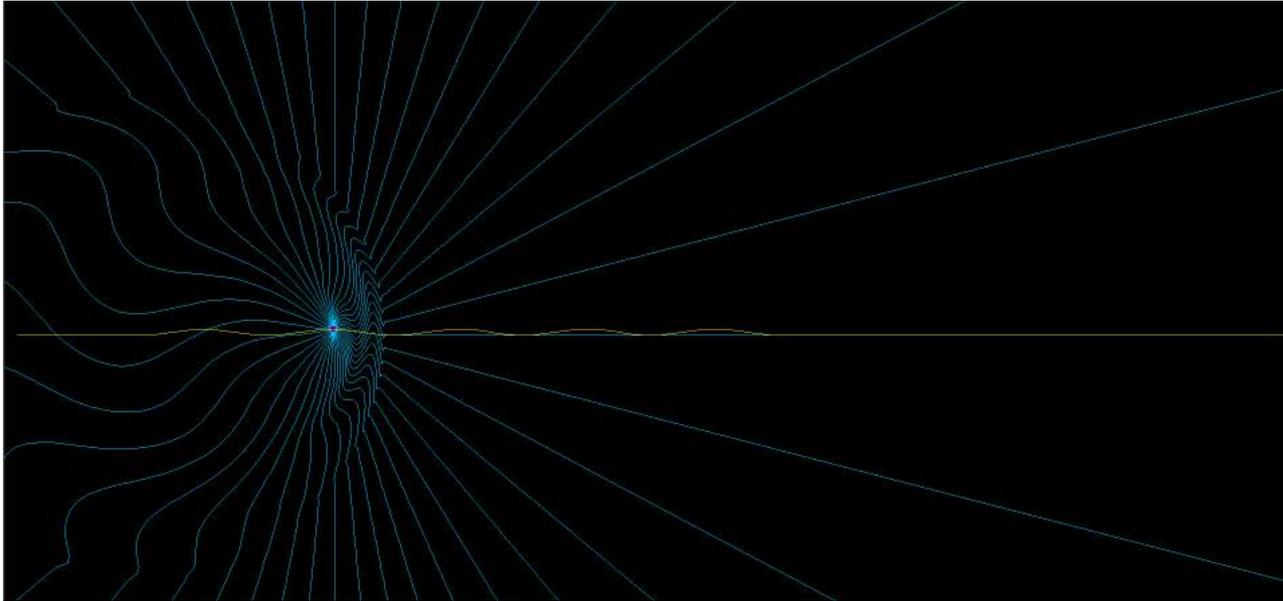
# RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: DIPOLO



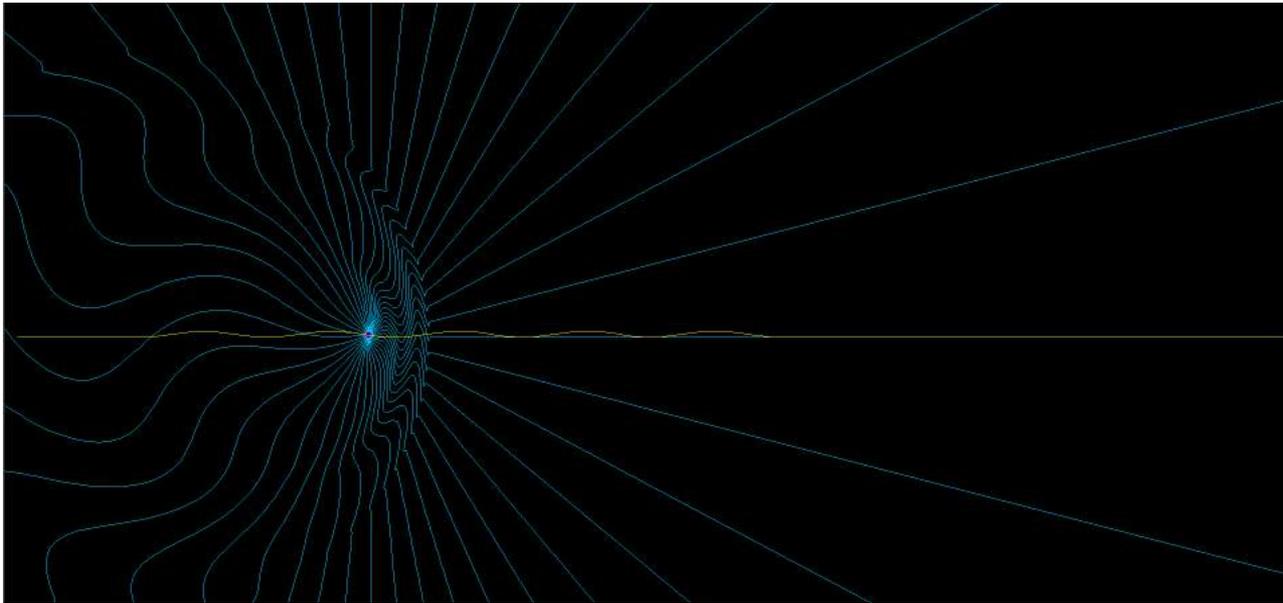
# RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: DIPOLO



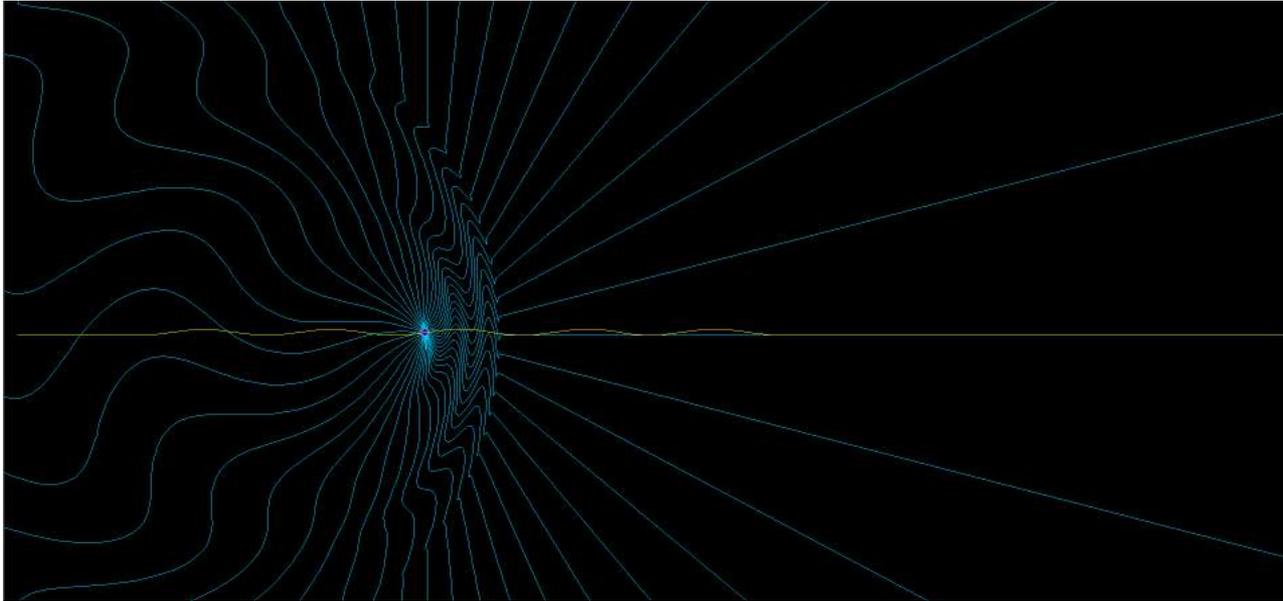
# RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: DIPOLO



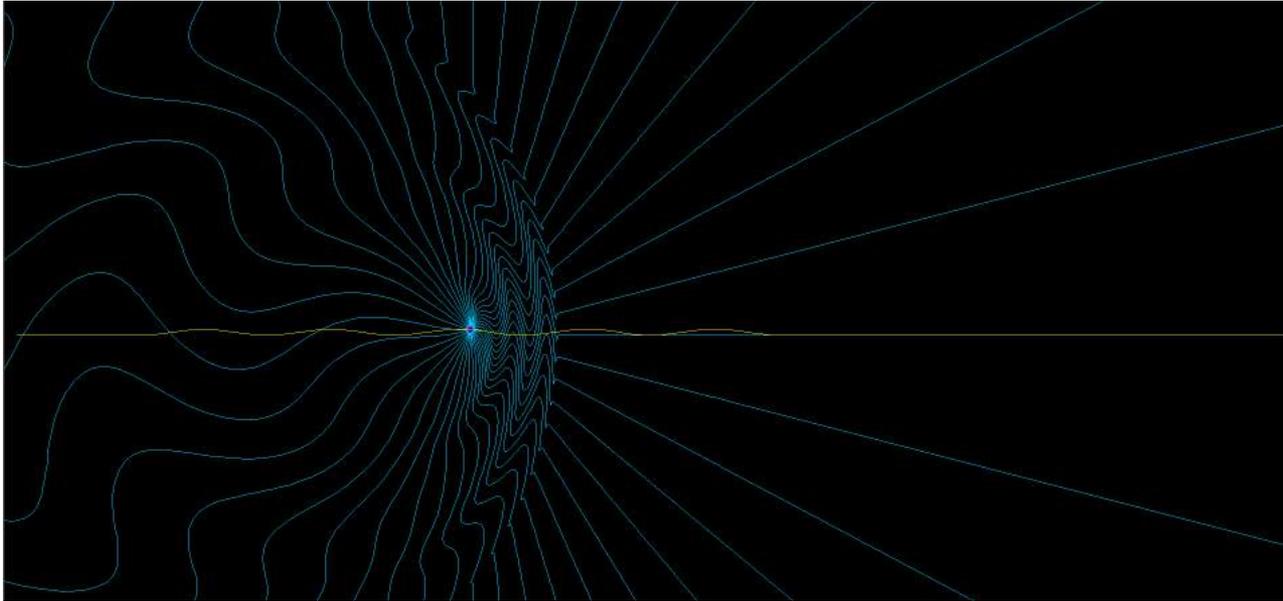
# RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: DIPOLO



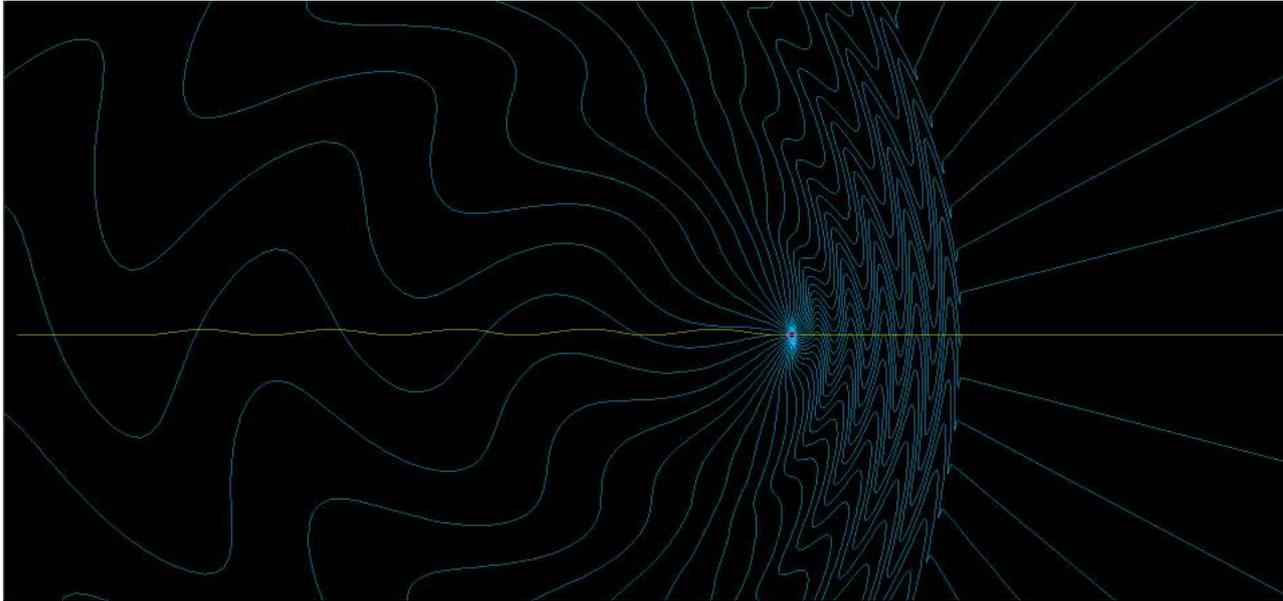
# RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: DIPOLO



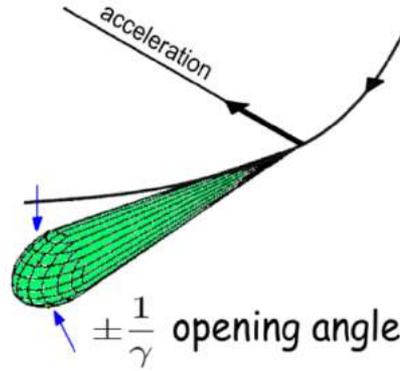
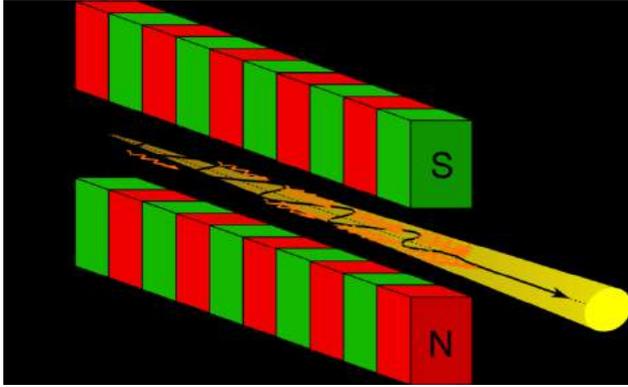
# RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: DIPOLO



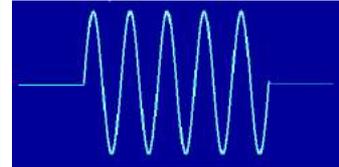
# RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: DIPOLO



# RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: DIPOLO



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



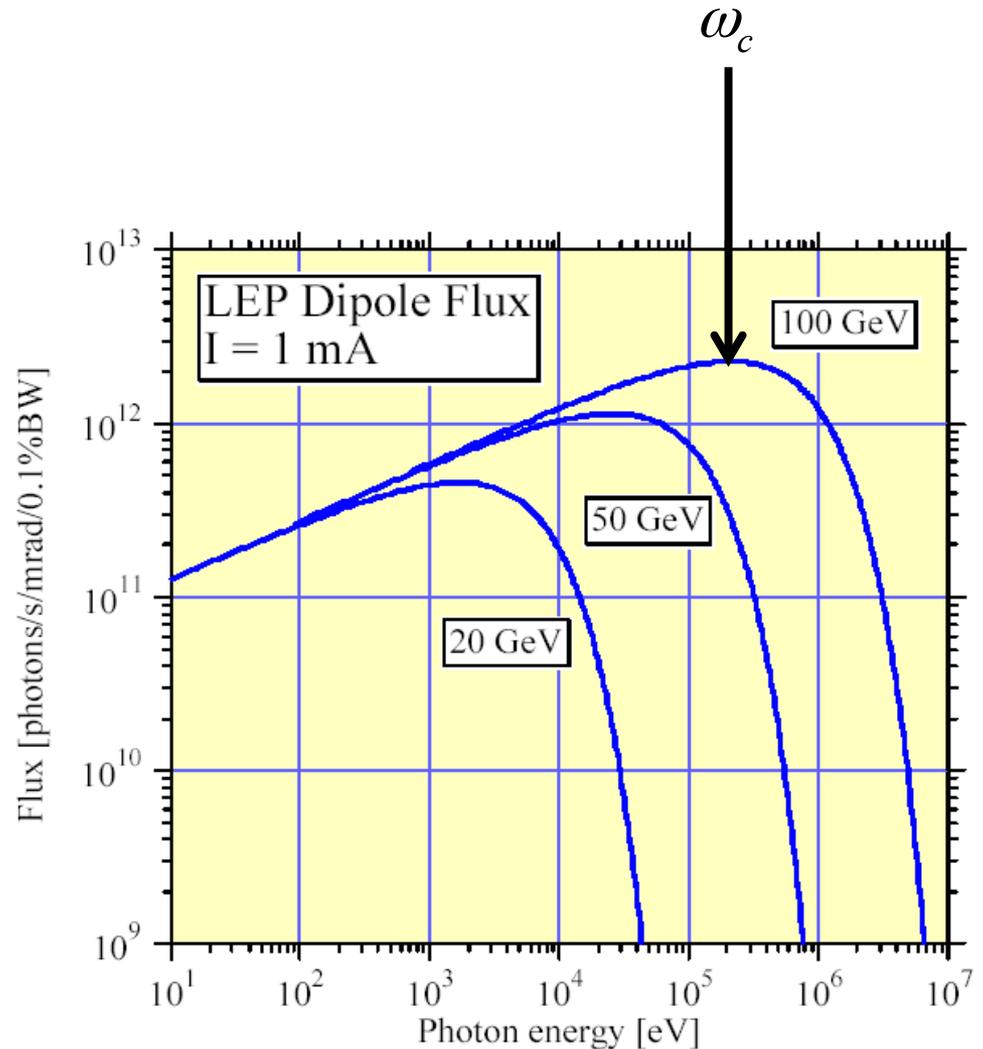
# Radiazione di sincrotrone: spettro in frequenza

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

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

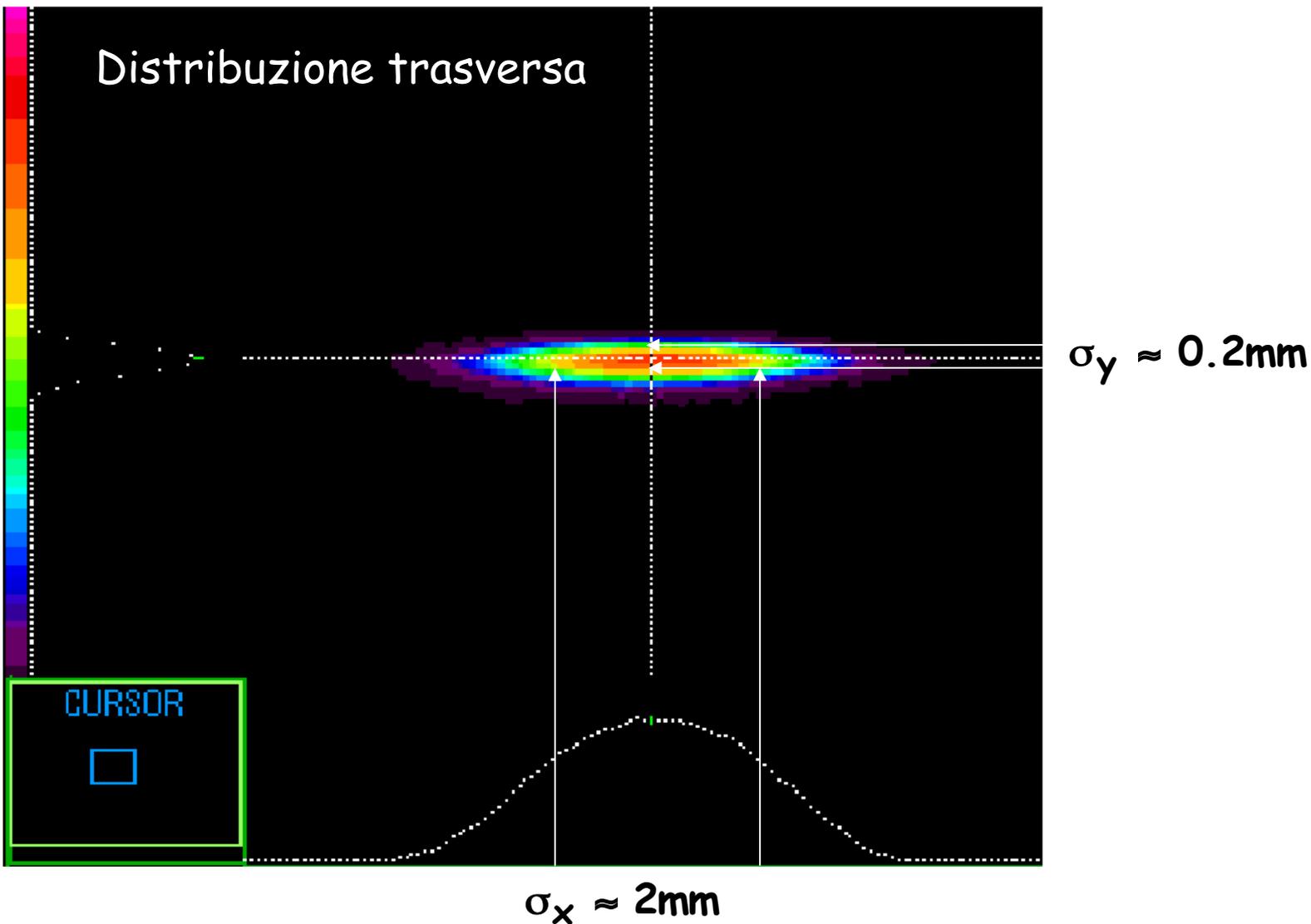
$$\lambda_c = \frac{4}{3} \frac{\pi \rho}{\gamma^3}$$

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



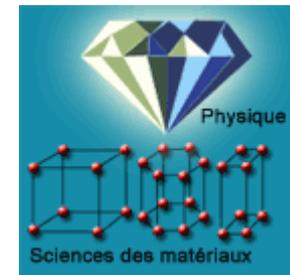
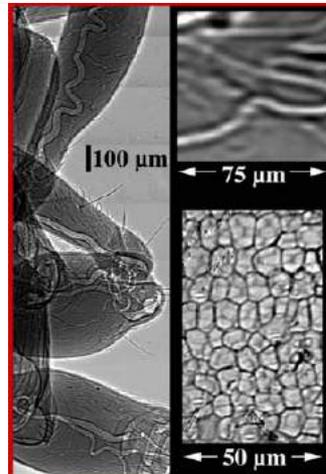
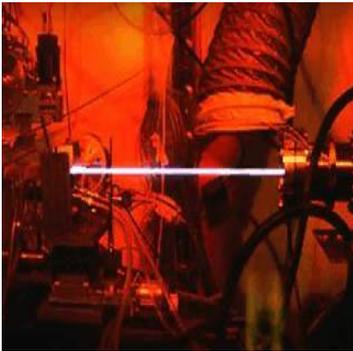
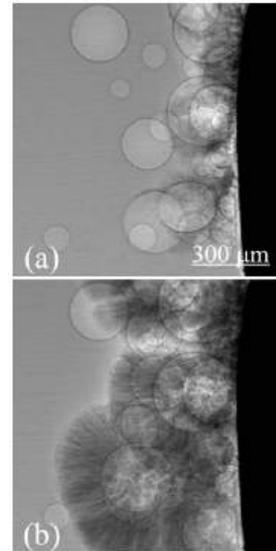
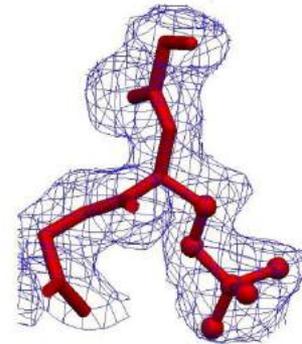
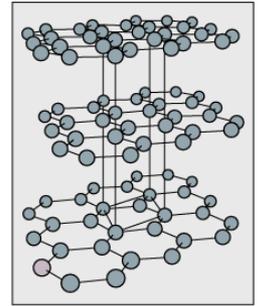
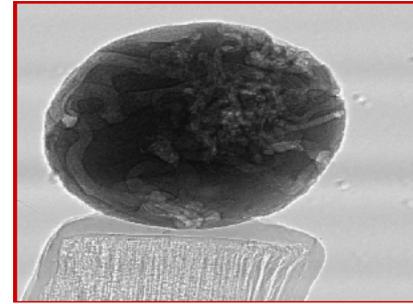
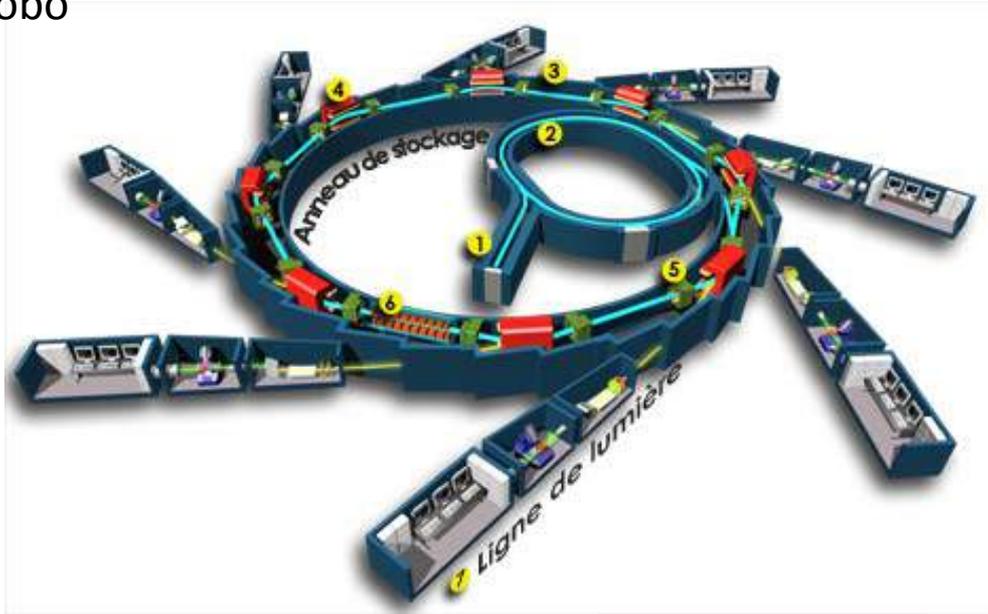
# “Vedere” la luce di sincrotrone

In DAΦNE la luce di sincrotrone è costantemente monitorata con telecamere. Il suo profilo trasverso e longitudinale riproduce la *forma del fascio nel dipolo*.



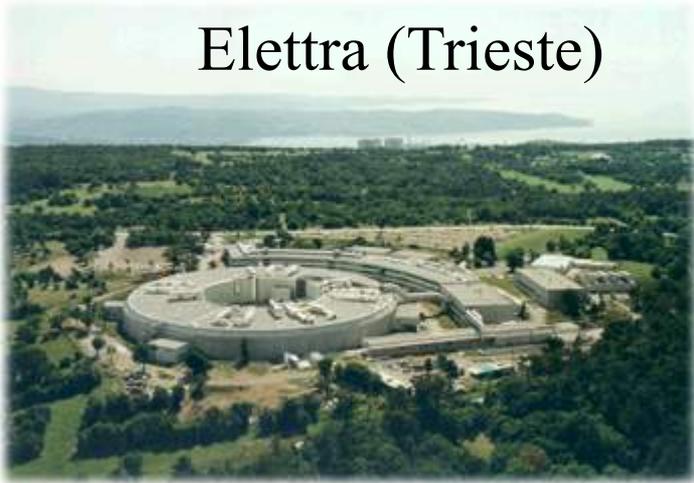
# Anelli di luce di sincrotrone

**Macchine dedicate** alla produzione di luce di sincrotrone sono diffuse in tutto il globo

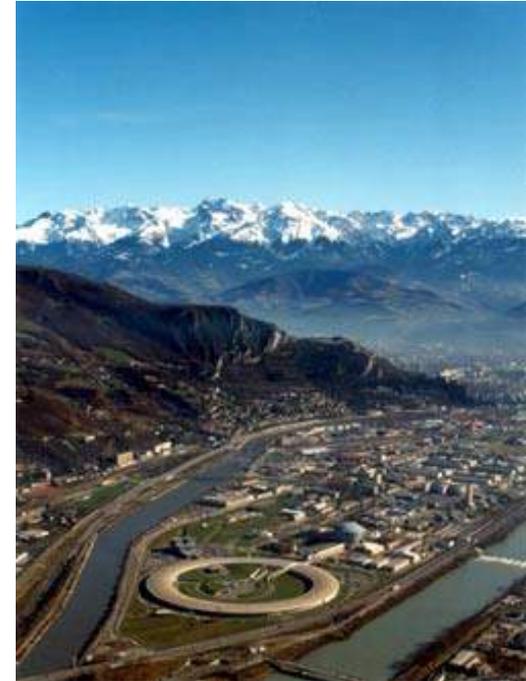


# Anelli di luce di sincrotrone: esempi

Elettra (Trieste)



ESRF (Francia)



SLS (Svizzera)



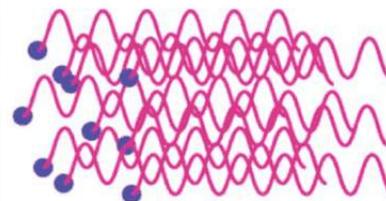
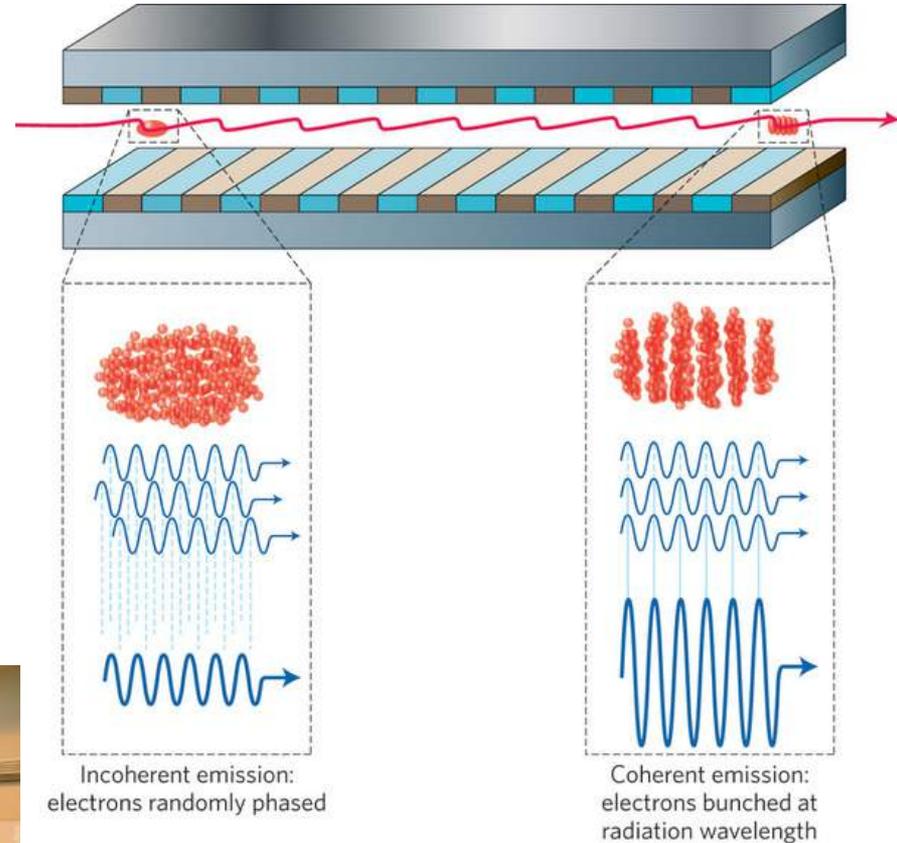
# Laser ad elettroni liberi: *Free Electron Lasers (FEL)*

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).

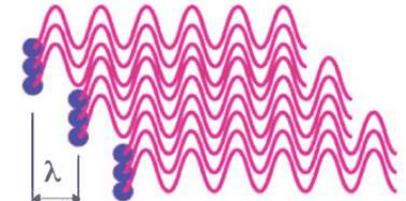
Un **LINAC ad e-** accelera **pacchetti** di elettroni di alta qualità (brillantezza) che, entrando nell'ondulatore, generano radiazione EM coerente, con un'amplificazione esponenziale.

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.

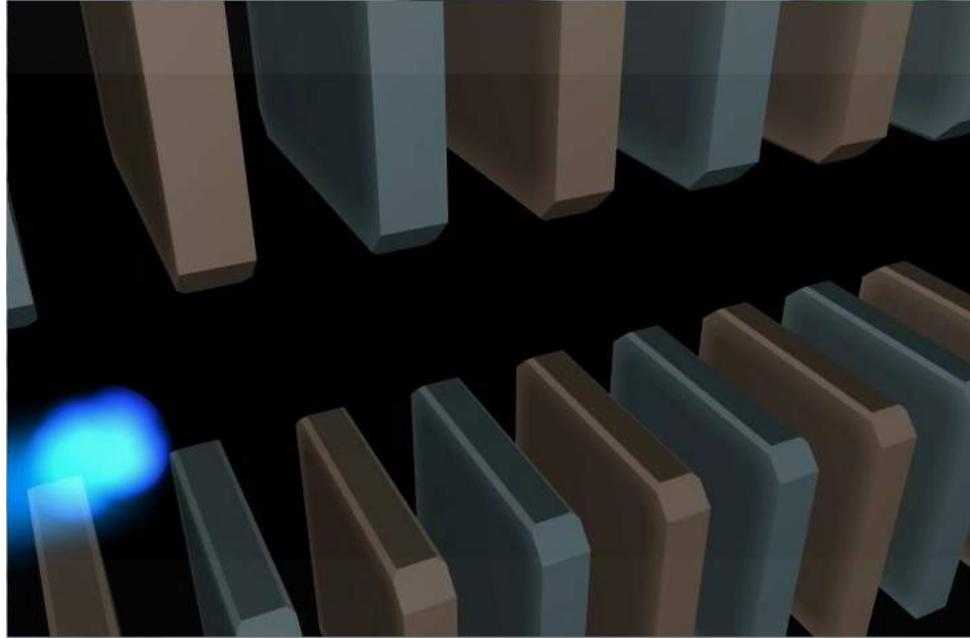


radiazione incoerente



radiazione coerente

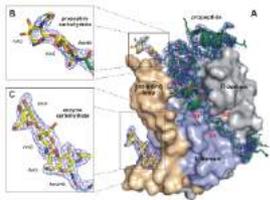
# FEL: video



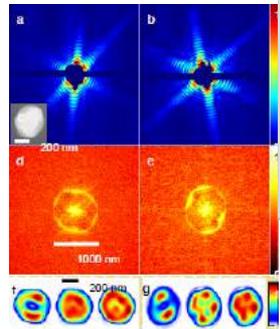
# FEL: RADIAZIONE COERENTE ED IMPULSI ULTRA-CORTI

⇒ 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...

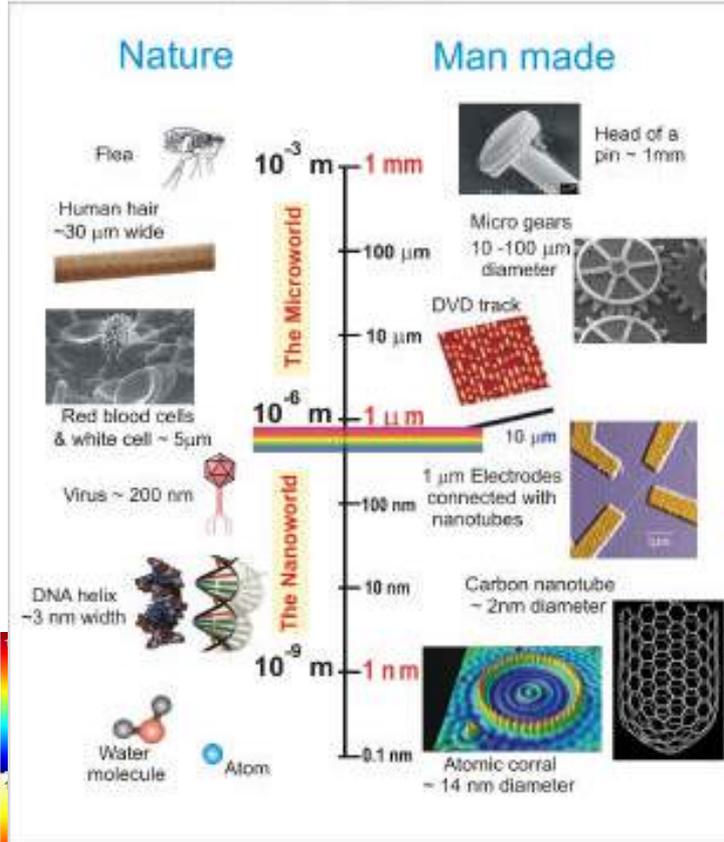


Inhibited Trypanosoma brucei Cathepsin B Structure Determined by Using an Xray Laser, L. Redecke et al. Science 339, 227 (2013)



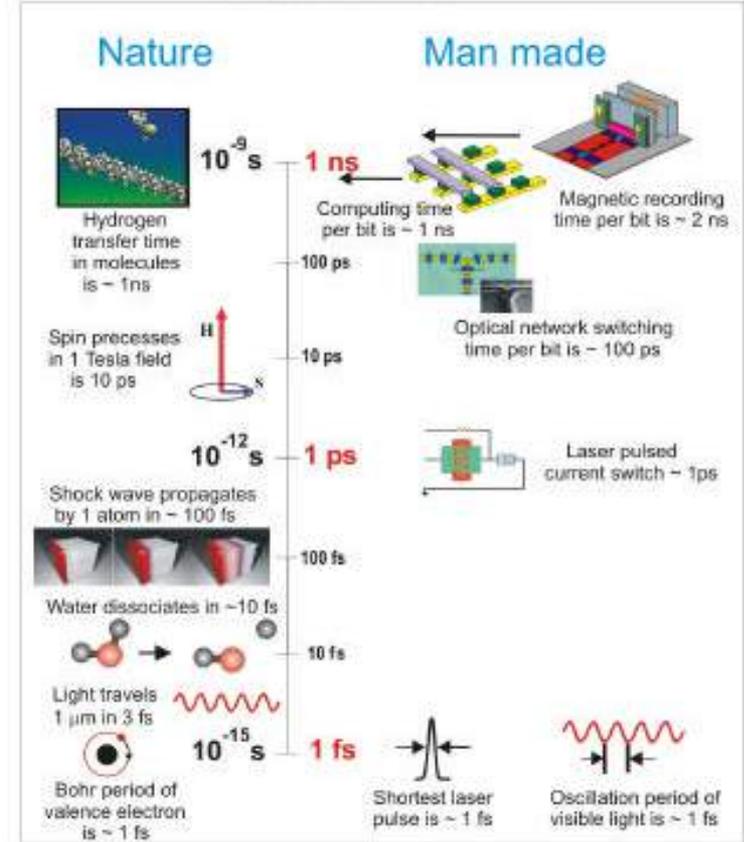
Imaging single mimivirus Seibert et al, Nature, 470, 78 (2011)

## Ultra-Small

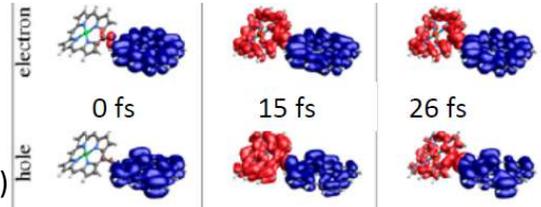


Courtesy C. Pellegrini and J. Stohr

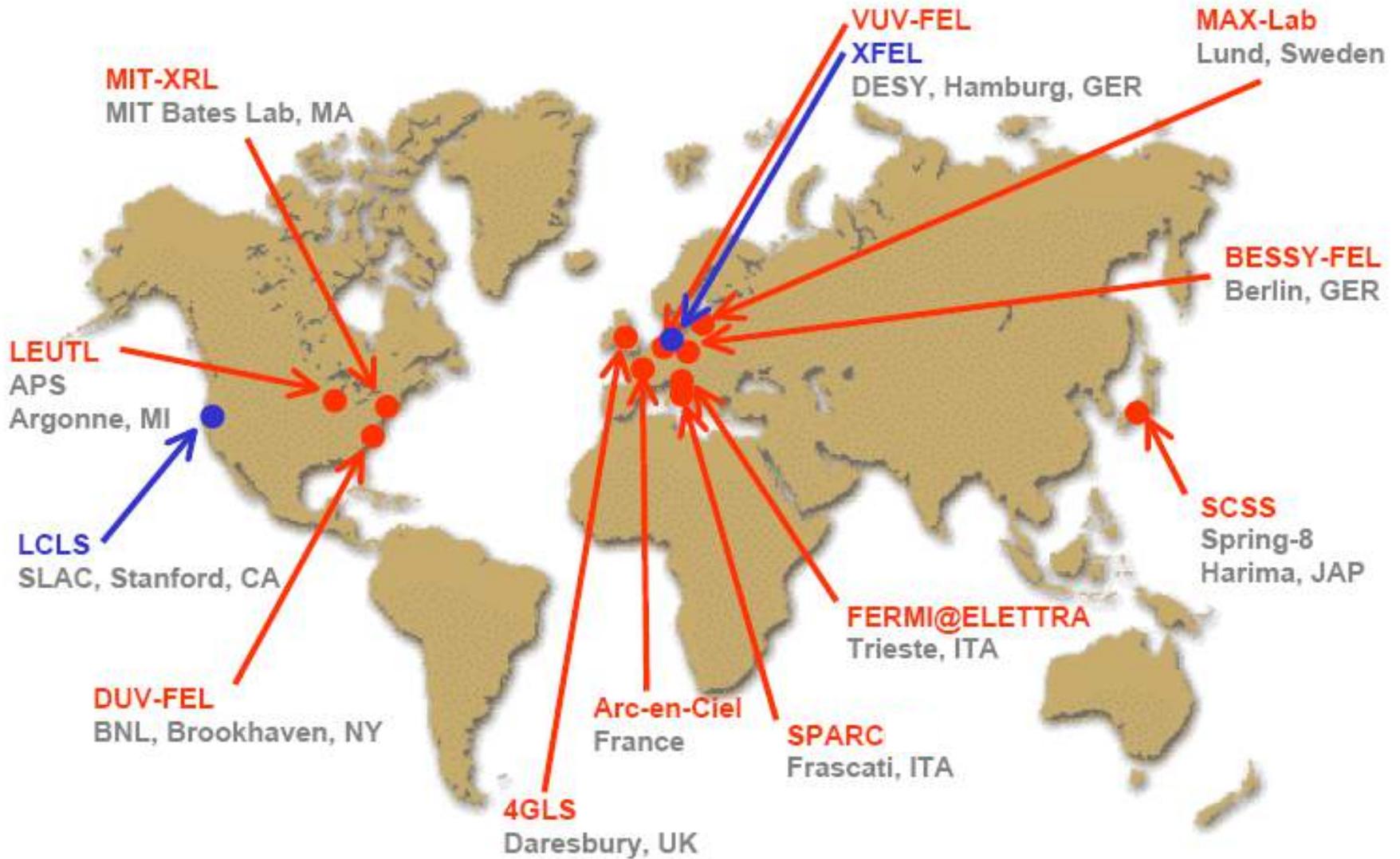
## Ultra-Fast



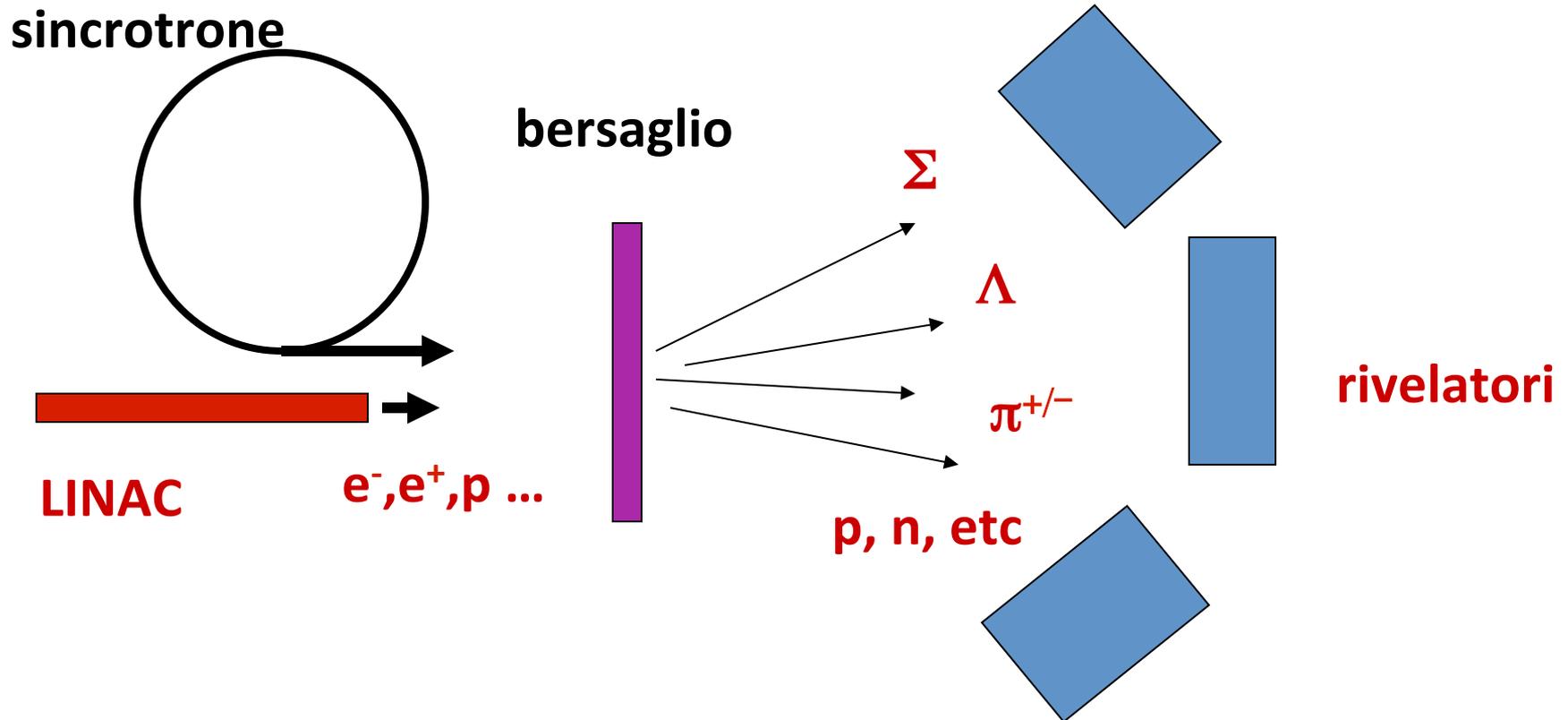
Simulated X-ray Raman Redistribu'on: (example: Metalloporphyn)



# FEL nel mondo



# Fisica delle Particelle con Acceleratori: collisioni su targhetta fissa

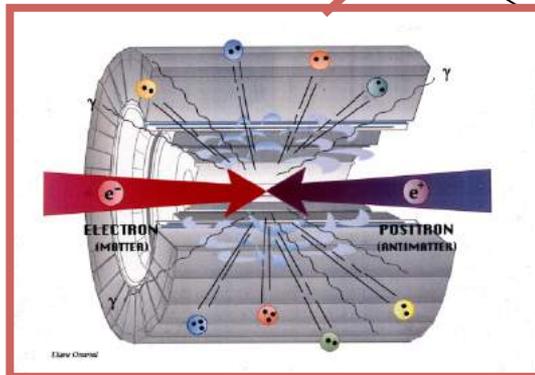
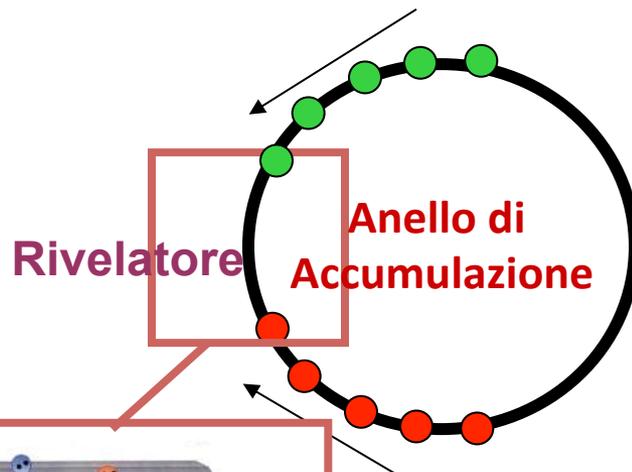


- 1) La materia è **vuota** : ciò che non ha interagito viene perduto;
- 2) Il bersaglio è **complesso**: molte delle particelle prodotte disturbano l'esperimento;
- 3) Rivelatore "**anisotropo**";
- 4) Parte dell'energia del fascio di particelle **non viene "sfruttata"** nell'interazione in quanto posseduta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

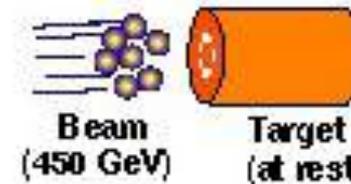
# Nascita dei Moderni Collider (Collisori)



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.



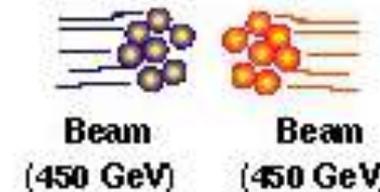
Fixed  
Target



Available  
Energy

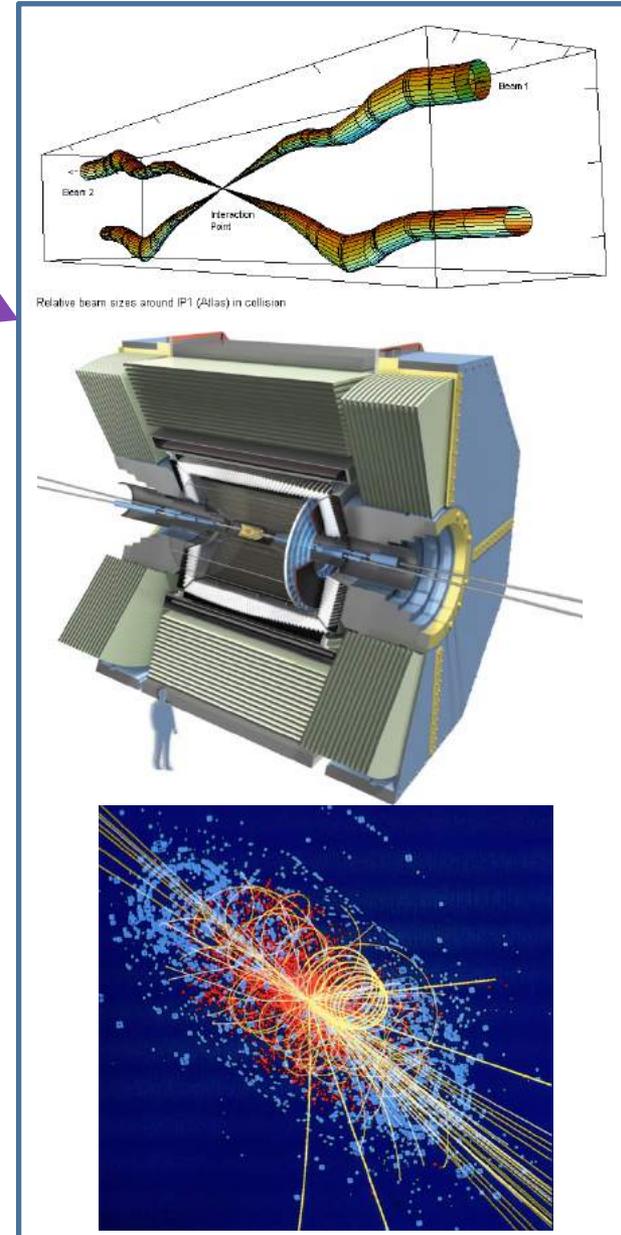
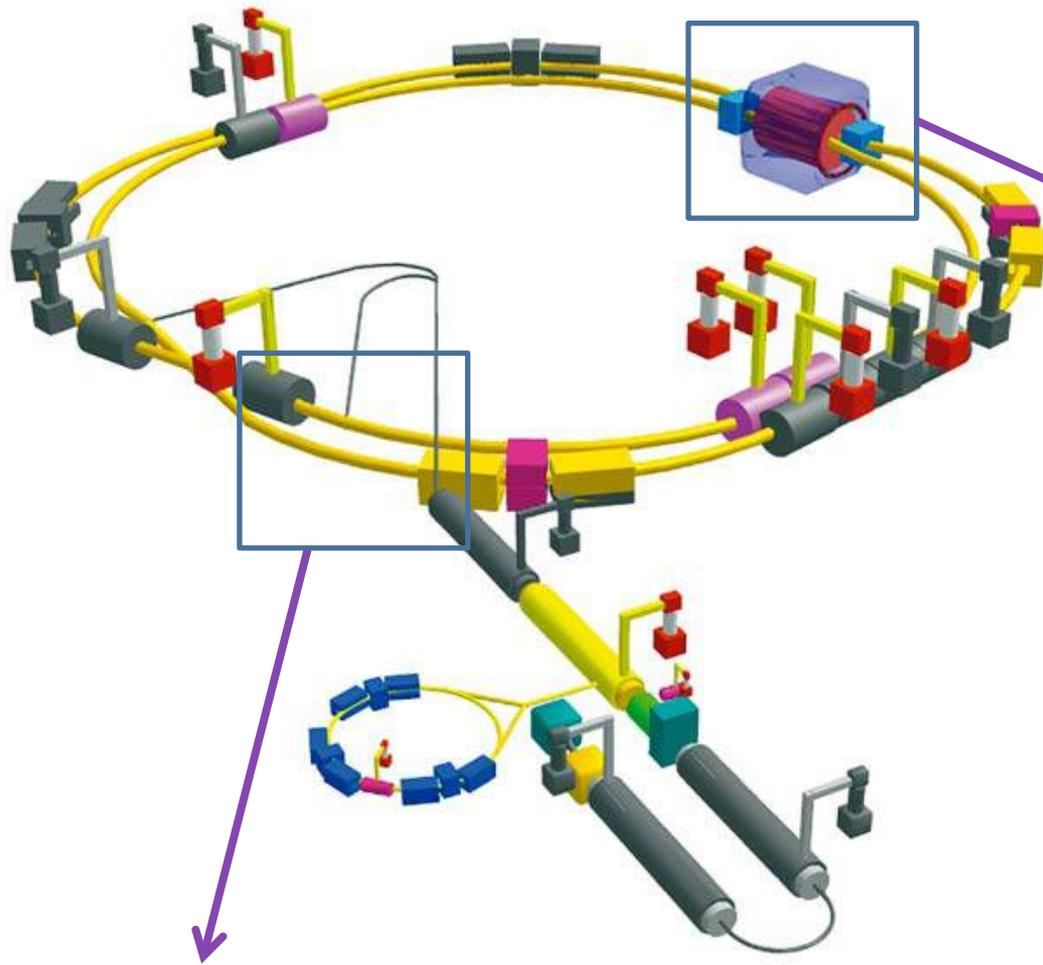
29 GeV

Colliding  
Beams



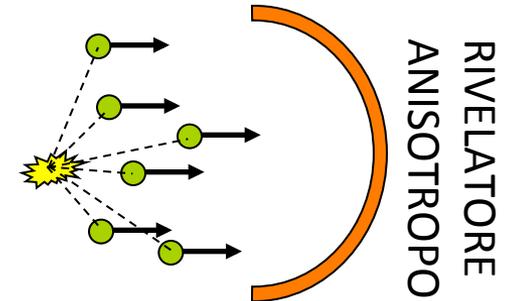
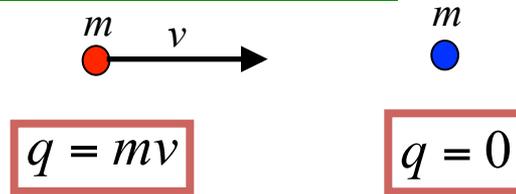
900 GeV

# FISICA FONDAMENTALE: COLLIDERS



# Energia Disponibile nell'interazione

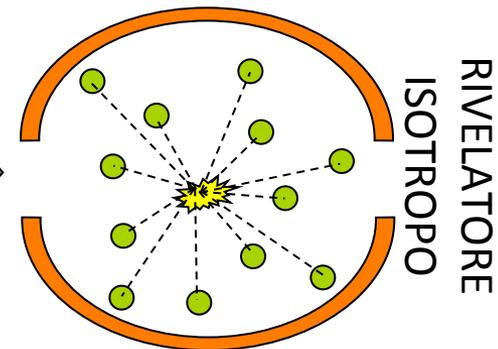
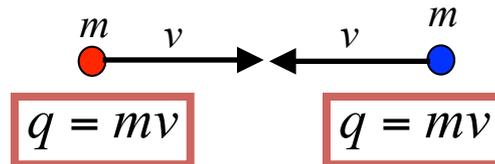
## COLLISIONE CONTRO BERSAGLIO FISSO



ENERGIA DISPONIBILE  
NELL'INTERAZIONE

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

## COLLISIONE FASCIO-FASCIO



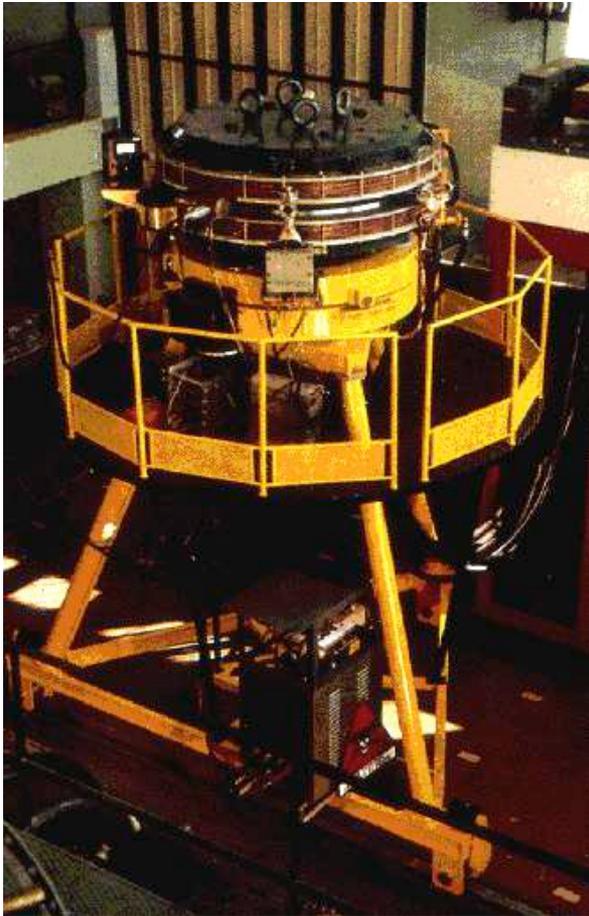
ENERGIA DISPONIBILE  
NELL'INTERAZIONE

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

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 foccheggiamento debole in grado di far circolare particelle ( $e^+/e^-$ ) con una energia di **250 MeV**.



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

IL NUOVO CIMENTO

The Frascati Storage Ring.

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

B. TOSCHKEK

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

(ricevuto il 7 Novembre 1960)

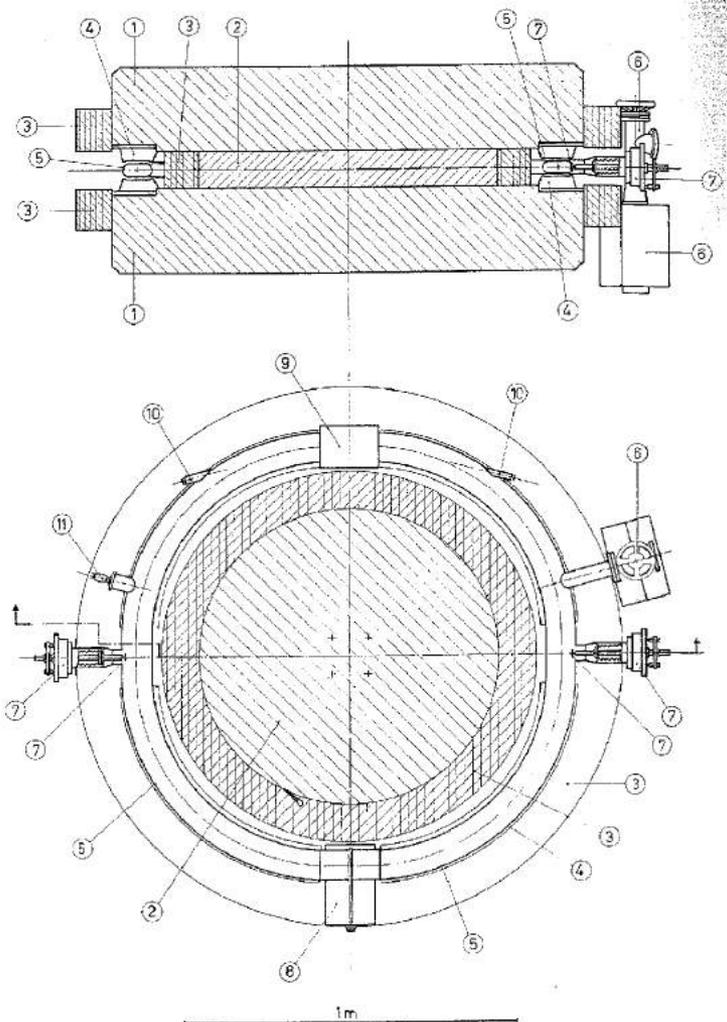
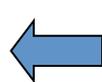
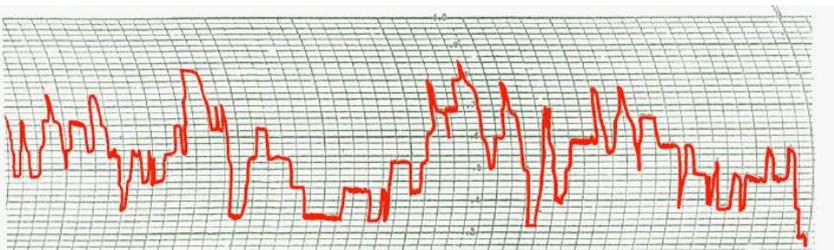


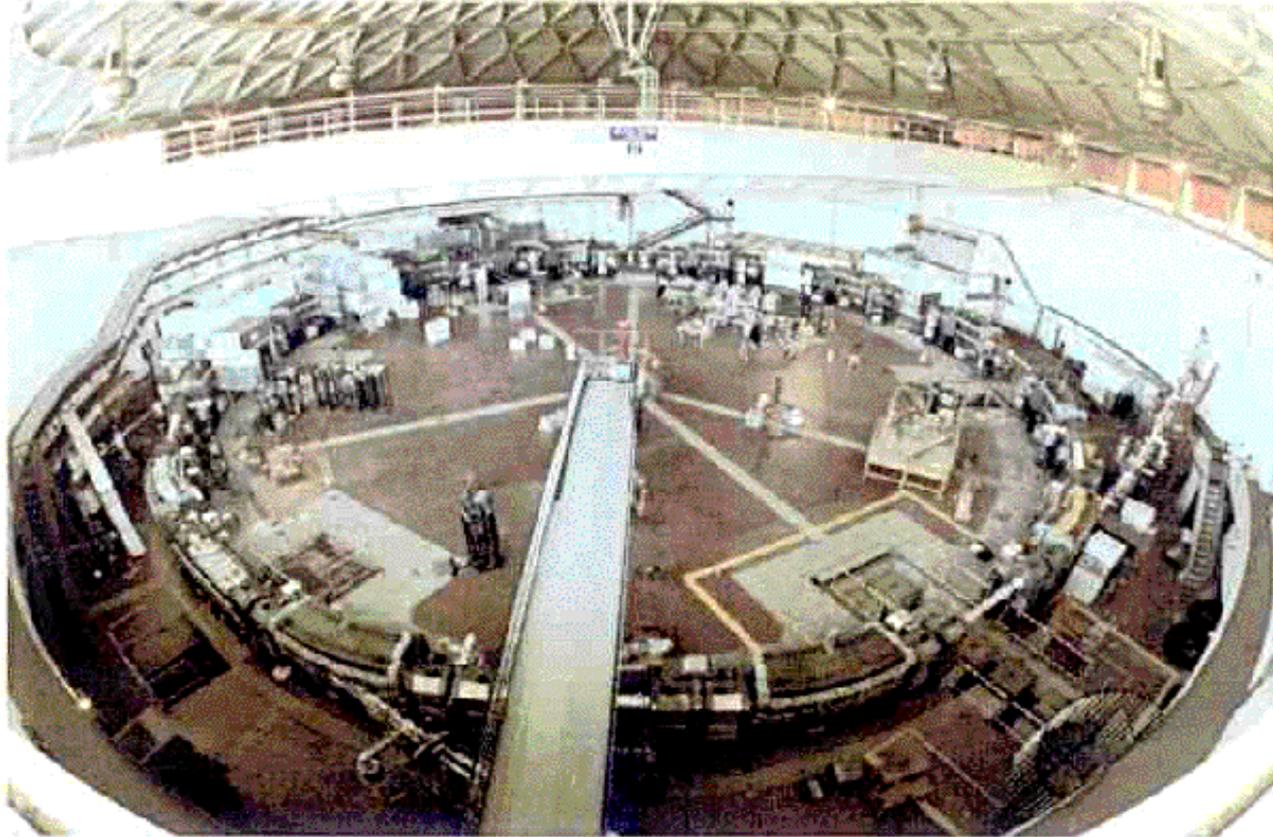
Fig. 1. - Elevation and plan section of the Frascati Storage Ring (anello di accumulazione - AdA): 1) magnet yoke; 2) magnet core; 3) coils; 4) polepieces; 5) doughnut; 6) titanium pump; 7) injection ports; 8) RF cavity; 9) experimental section; 10) windows for the observation of the synchrotron radiation;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

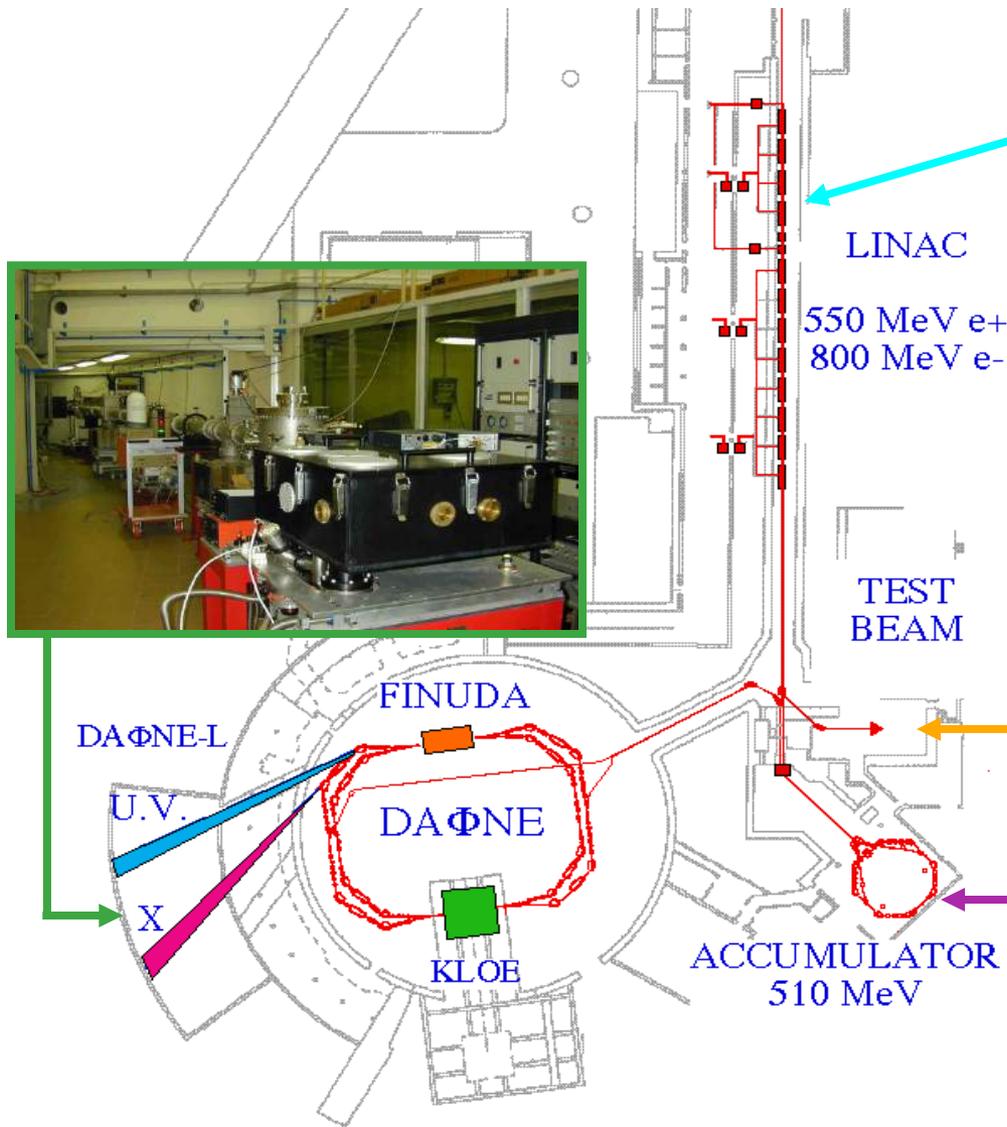


La **costruzione della nuova macchina iniziò nel 1963** e il primo elettrone fu immagazzinato nel 1967. Un LINAC di 350 MeV fu utilizzato come iniettore. La corrente massima circolante in ADONE era di **100 mA in 3 pacchetti**.

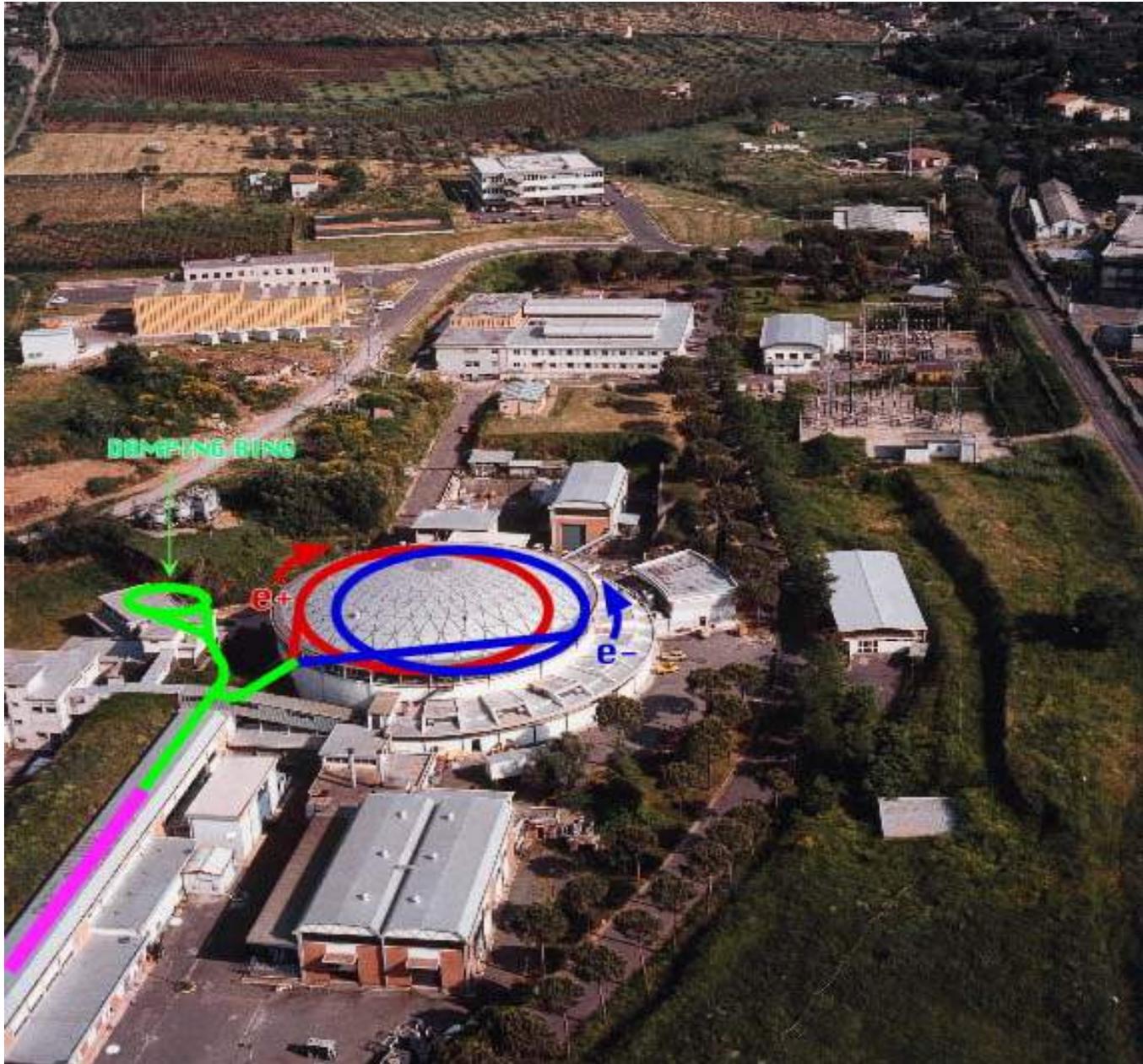
Si raggiunse la luminosità di progetto:  $3 \times 10^{29} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ .

ADONE fu spento il 26 Aprile 1993.

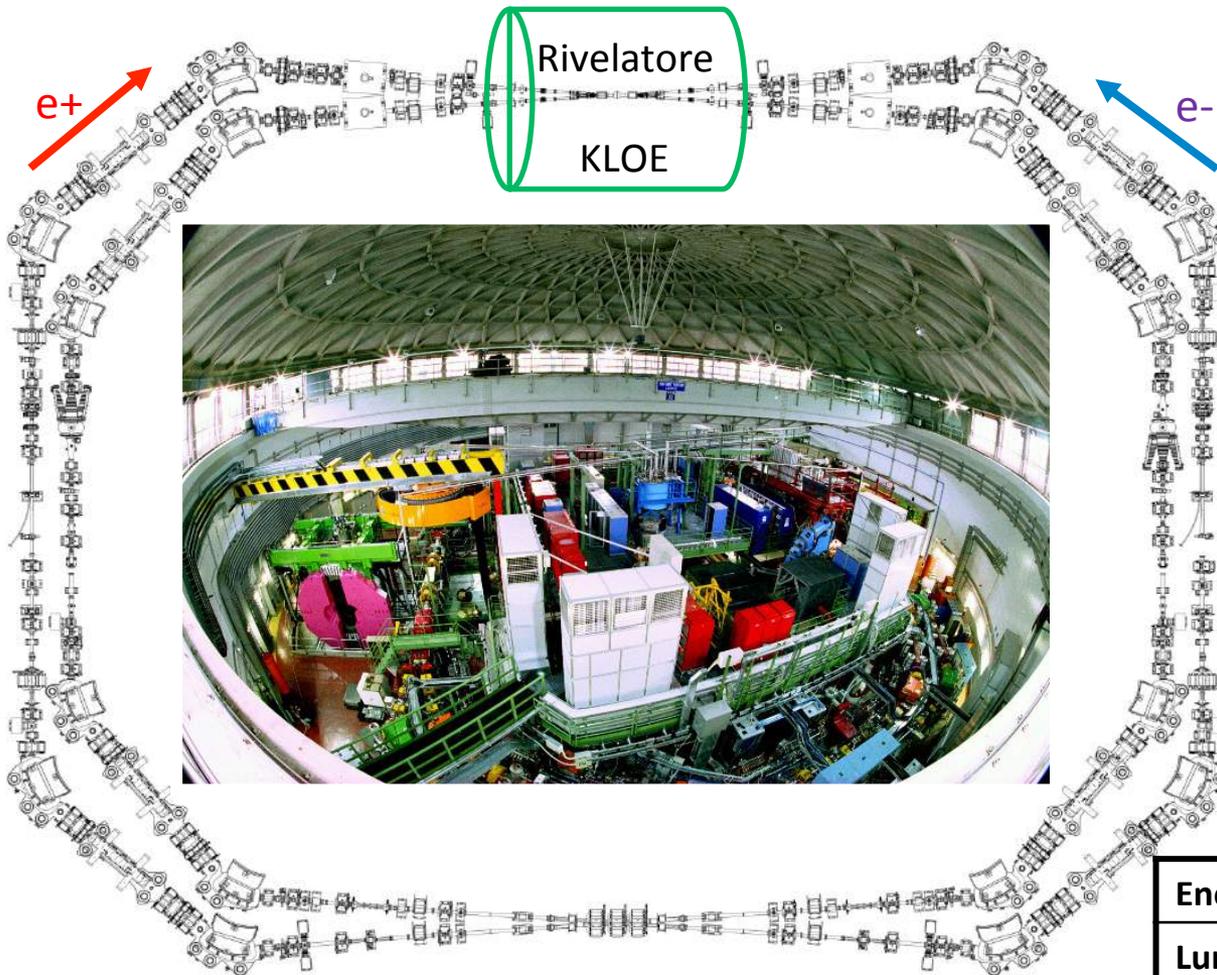
# La $\Phi$ -Factory a Frascati: DAΦNE



# La $\Phi$ -Factory a Frascati



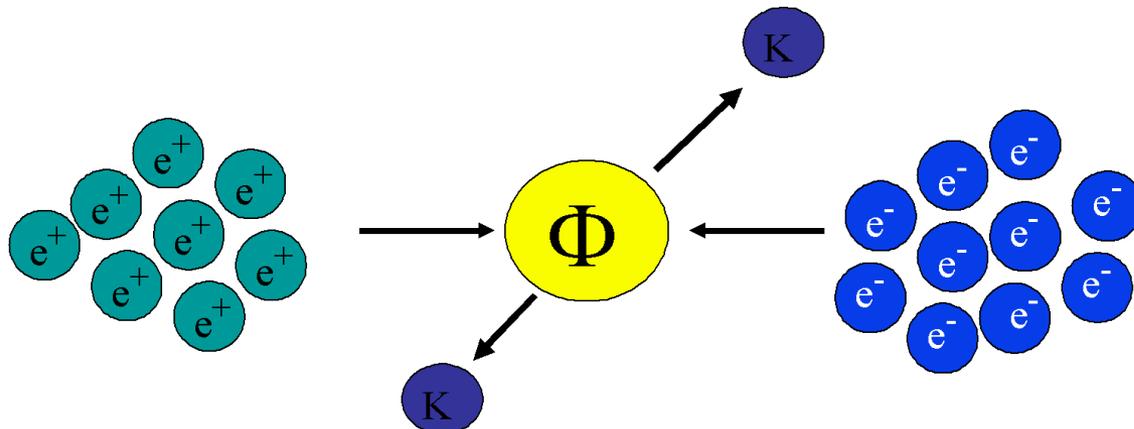
# Alcuni parametri di DAΦNE



<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**

Ecco come appare un evento ipernucleare all'interno del rivelatore

di macchine acceleratrici - Acitrezza 11-15 Giugno 2007

**DEAR**  
(DAΦNE Exotic Atom Research)

**Idrogeno Kaonico**

Target cell cold finger, Vacuum chamber, Target-cell, CCDs, DEAR Beam pipe, Kaon entrance window, Pumping line

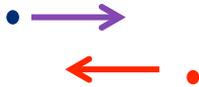
$2p \rightarrow 1s (K_{\alpha})$   
**X ray of interest**

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

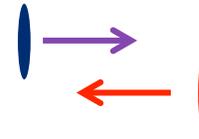
Due particelle ( $e^+/e^-$  a DAΦNE, ad esempio) che collidono possono produrre **tipi diversi di eventi**, alcuni più probabili di altri. La **sezione d'urto**  $\sigma$  di un determinato evento è **proporzionale alla probabilità che l'evento avvenga** e si misura in  $\text{cm}^2$ .

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



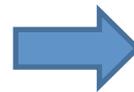
**Evento più probabile.**

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

$$\mathcal{L} = \int_0^t \int \int \int_{-\infty}^{+\infty} \rho^+(x,y,s+ct) \rho^-(x,y,s-ct) 2cdt ds dx dy$$

# Luminosità di un *collider*

Per fasci gaussiani la luminosità si calcola come:

Numero di particelle per fascio

**La luminosità si aumenta** aumentando:

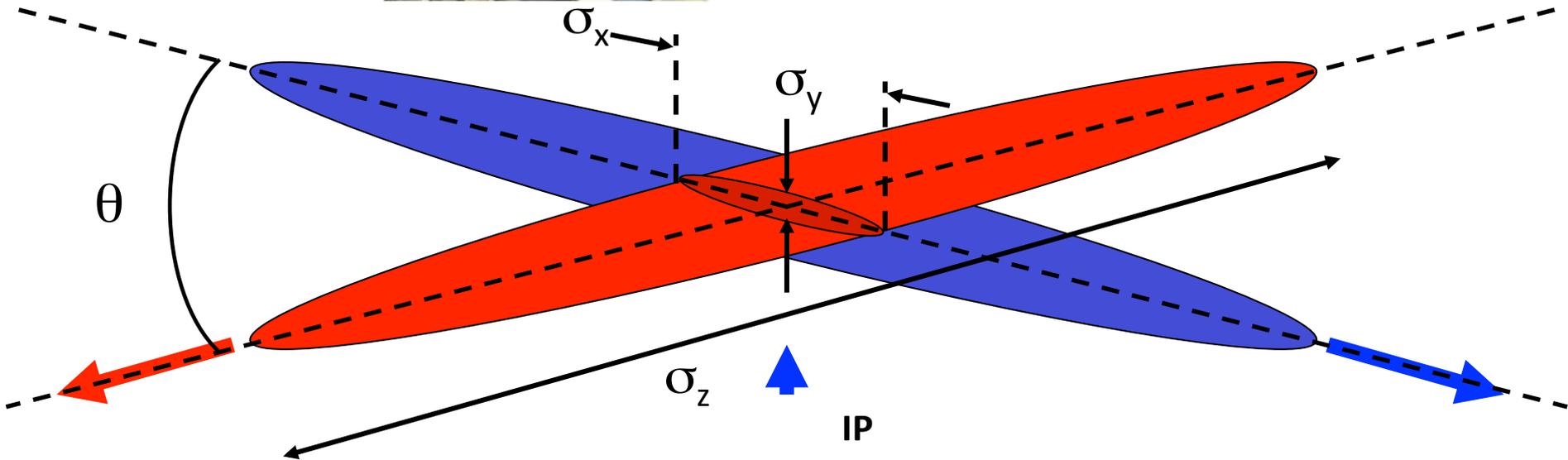
- la densità dei fasci
- frequenza di collisione
- la quantità di particelle collidenti

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

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



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

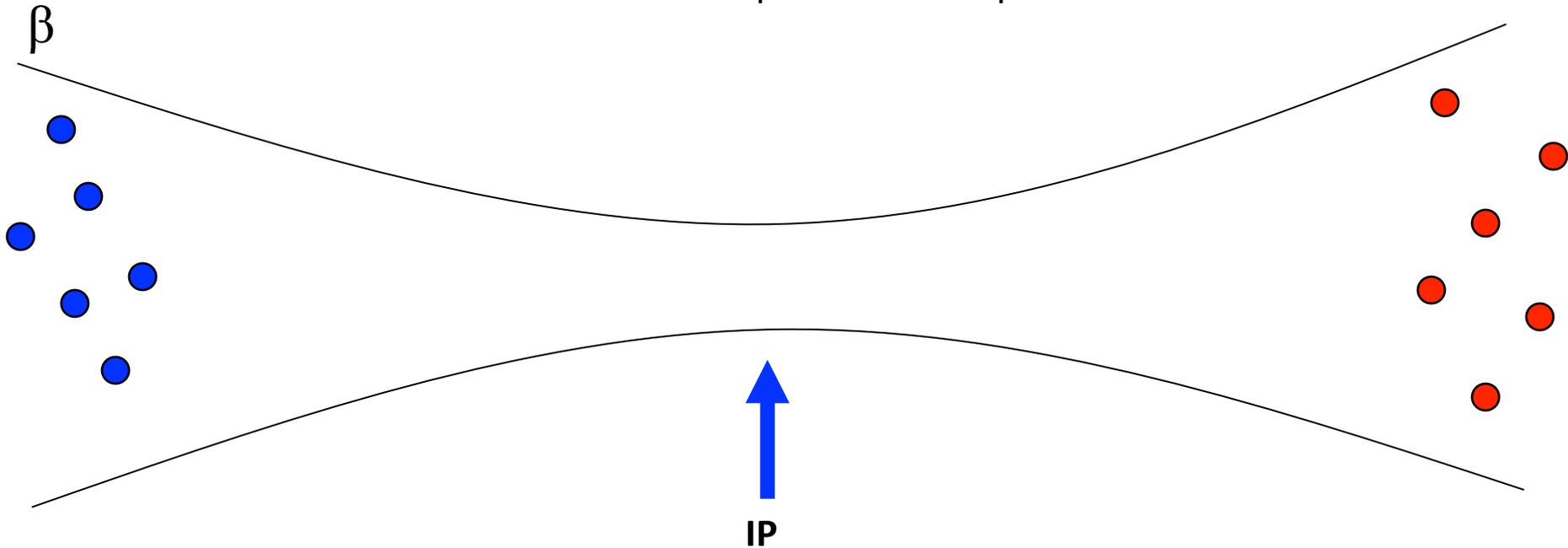


# Luminosità di un *collider*

Numero di particelle per fascio

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

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

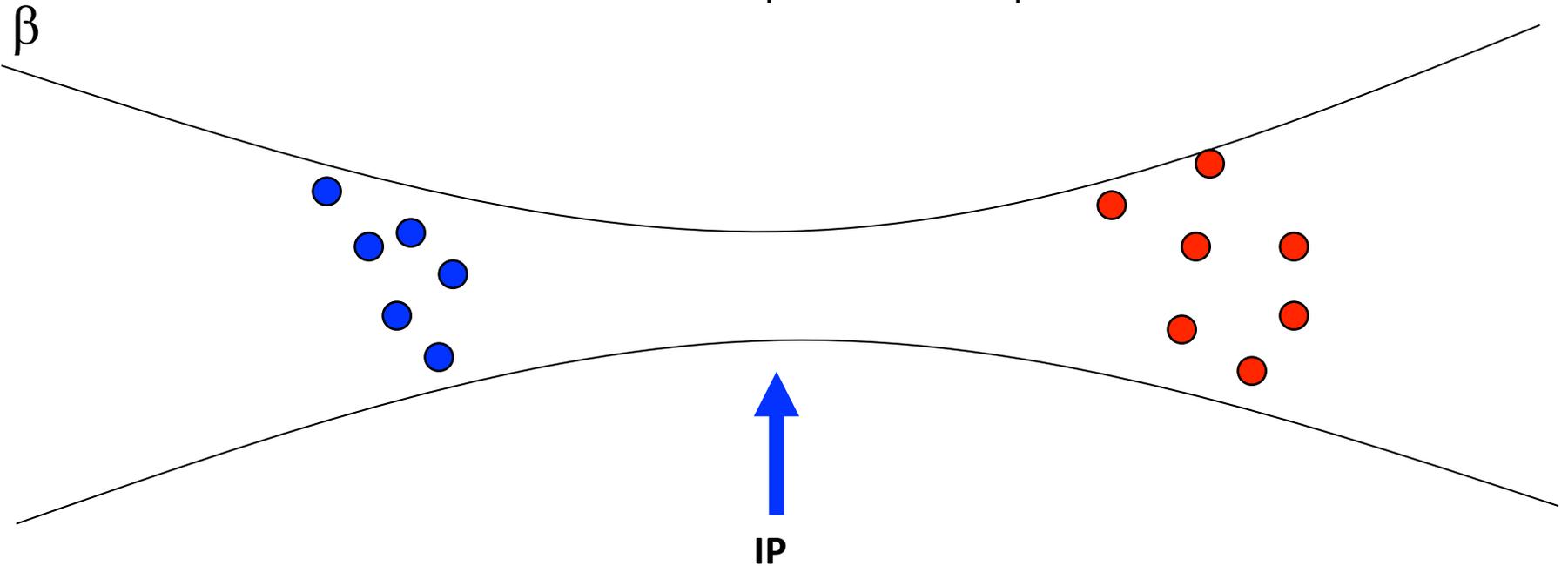


# Luminosità di un *collider*

Numero di particelle per fascio

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

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



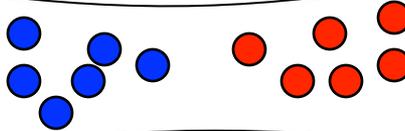
# Luminosità di un *collider*

Numero di particelle per fascio

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

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

$\beta$



IP

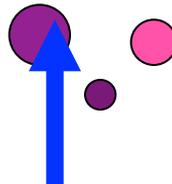
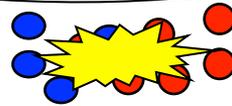
# Luminosità di un *collider*

Numero di particelle per fascio

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

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

$\beta$



IP

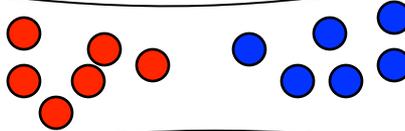
# Luminosità di un *collider*

Numero di particelle per fascio

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

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

$\beta$



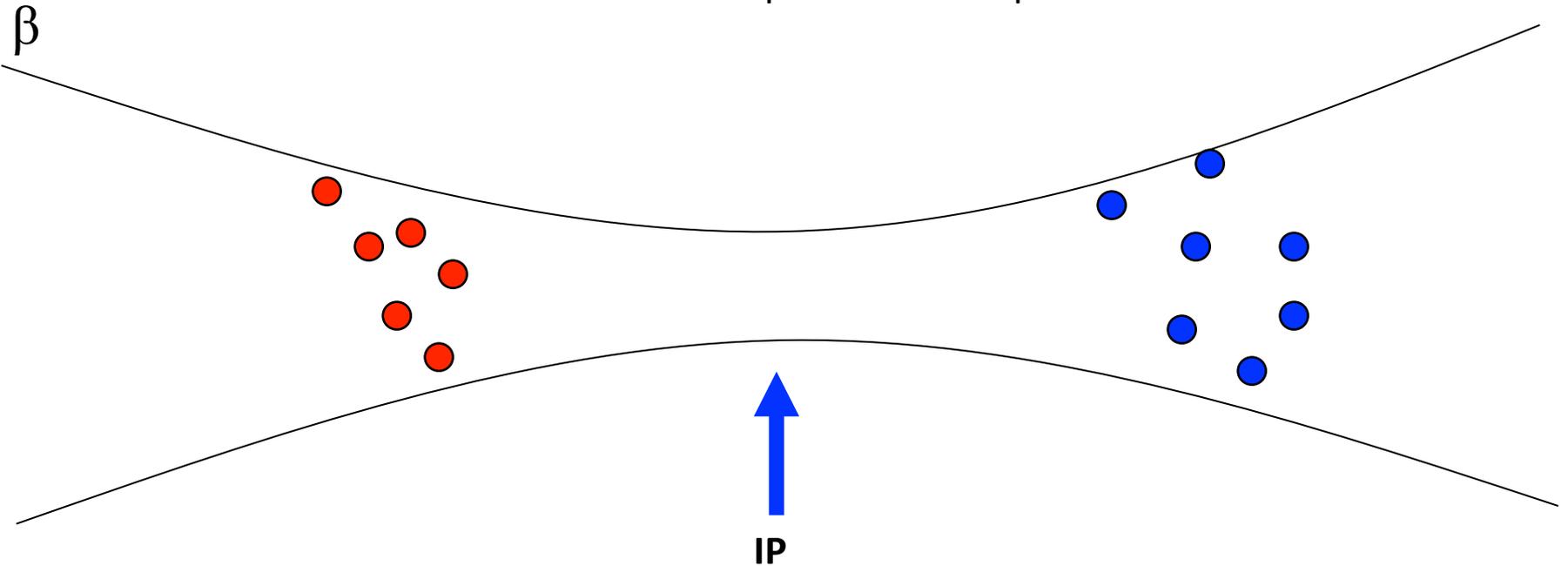
IP

# Luminosità di un *collider*

Numero di particelle per fascio

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

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

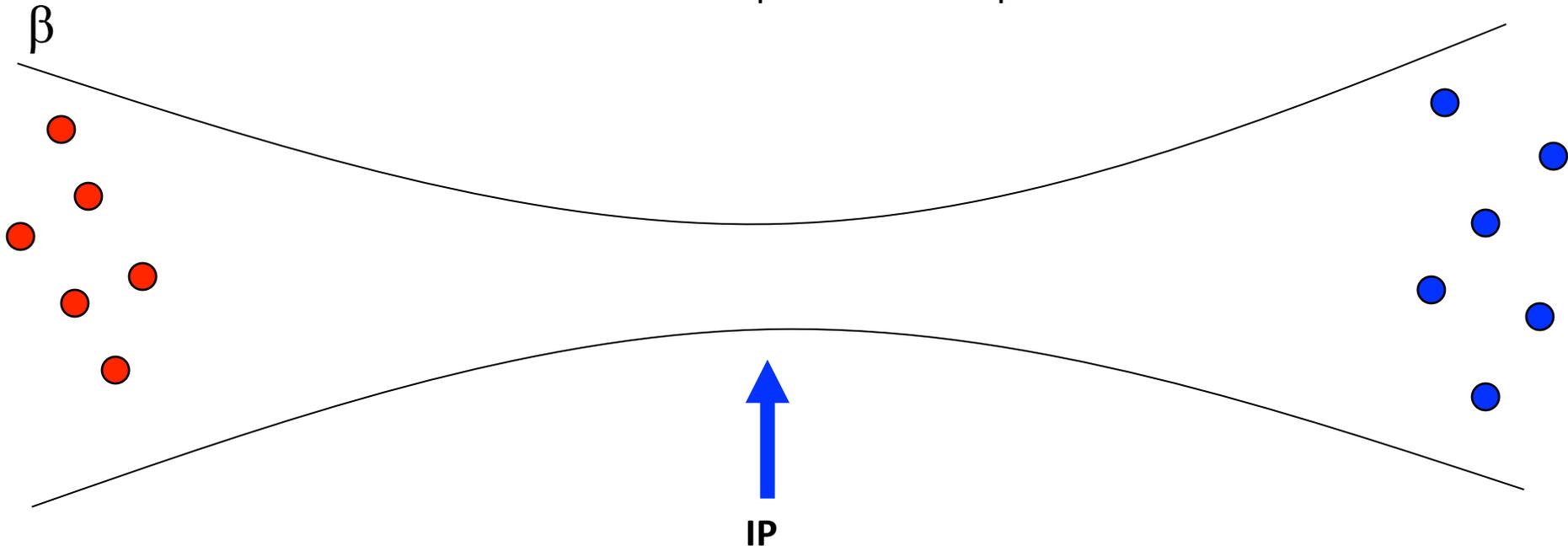


# Luminosità di un *collider*

Numero di particelle per fascio

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

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

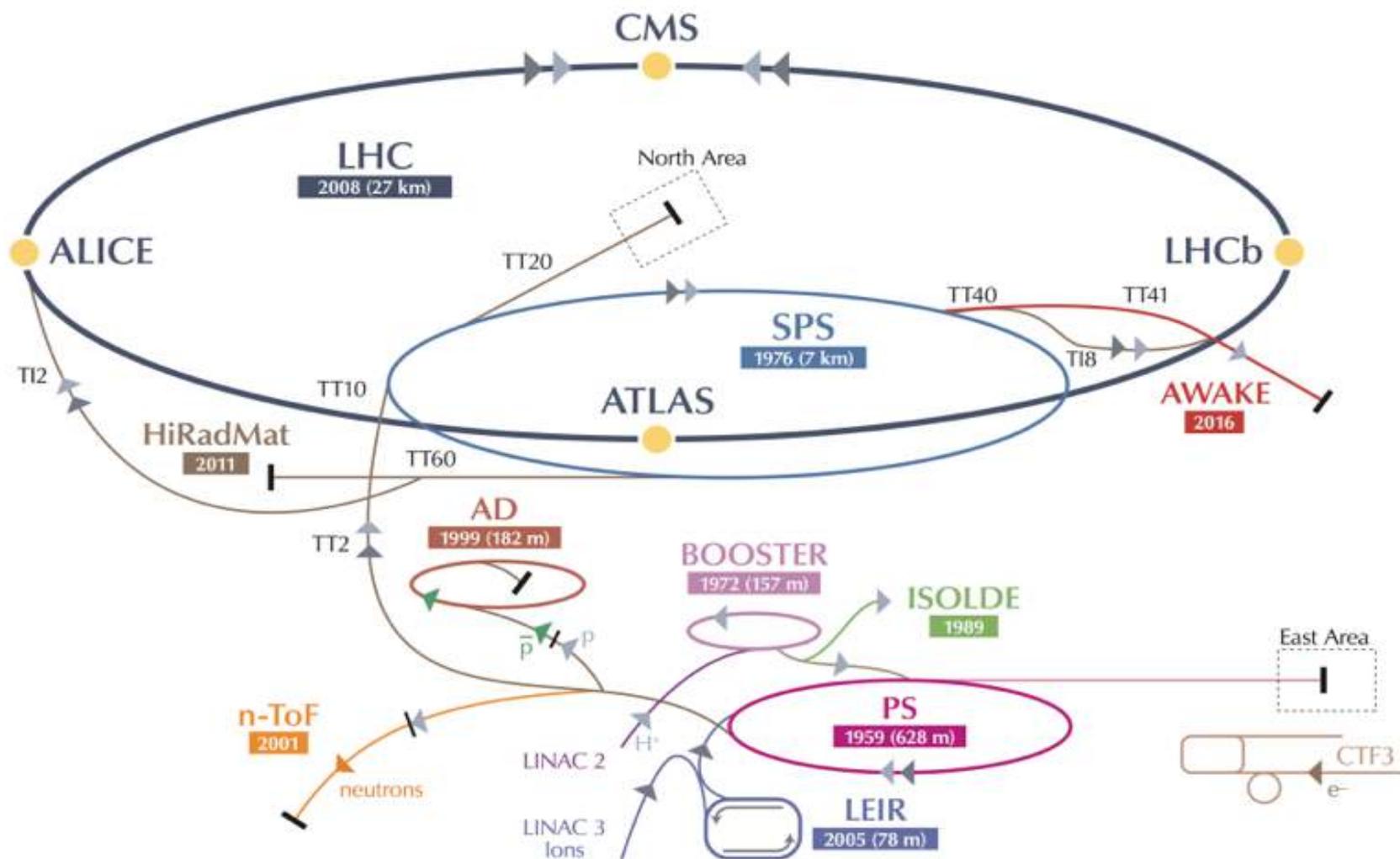
$$L = \frac{\overset{\sim 2 \cdot 10^{10}}{N^{e+}} N^{e-}}{4\pi \underset{\substack{1 \text{ mm} \\ \sigma_x}}{\sigma_x} \underset{\substack{10 \mu\text{m} \\ \sigma_y}}{\sigma_y}} \times f_{\text{collisione}} \overset{f_{\text{RF}} = 368.000.000 \text{ s}^{-1} \text{ (120 pacchetti)}}{\cong 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}}$$

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



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

# FISICA FONDAMENTALE: ACCELERATORI DEL CERN



▶ p (proton)    ▶ ion    ▶ neutrons    ▶  $\bar{p}$  (antiproton)    ▶ electron    ▶↔↔ proton/antiproton conversion

# 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 parametri

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

energia 7 TeV (massima per fascio)

numero di pacchetti 2808

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

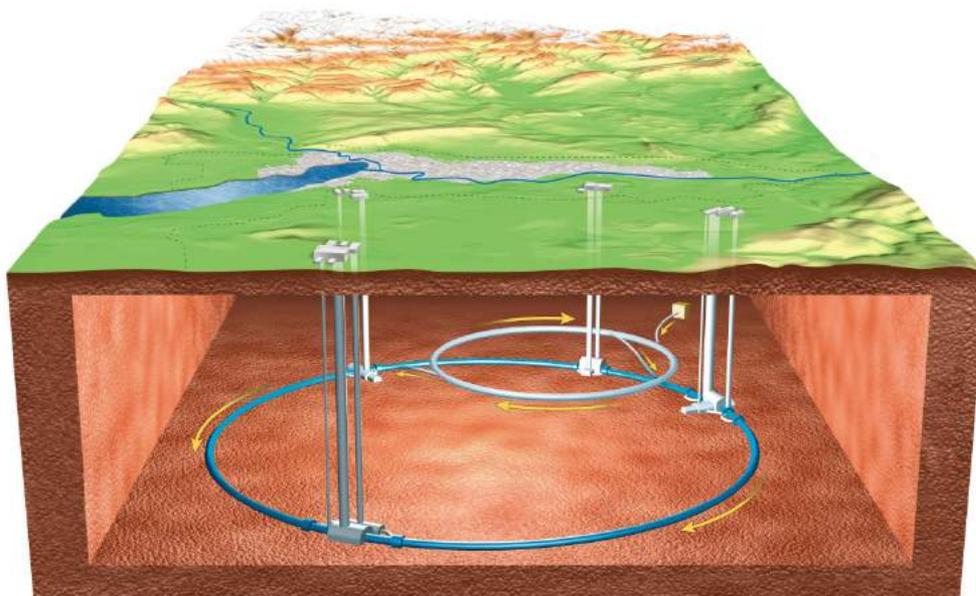
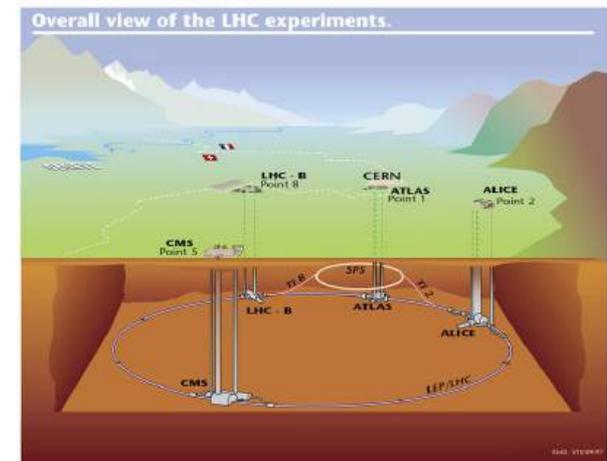
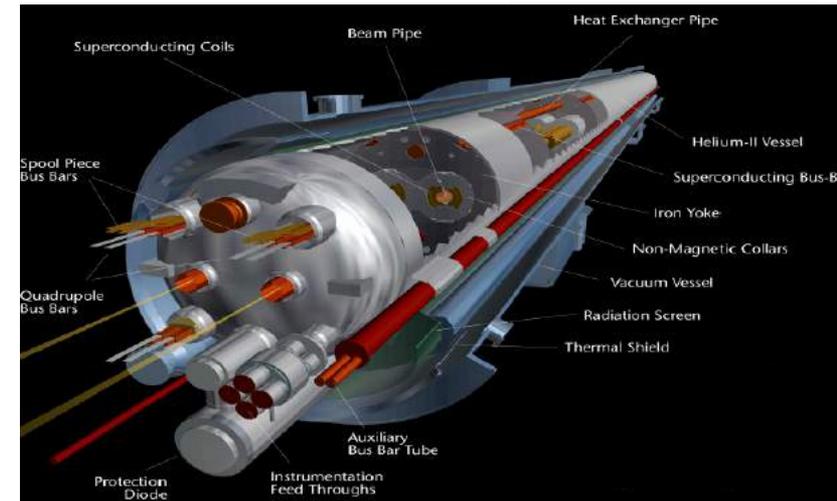
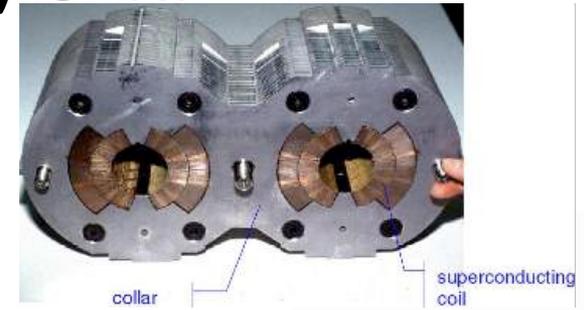
emittanza  $5 \cdot 10^{-10}$  m

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

circonferenza 27.8 Km

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

$T = 1.9$  K



# LHC (Large Hadron Collider) CERN

Ingresso dei dipoli criogenici nel tunnel di LHC



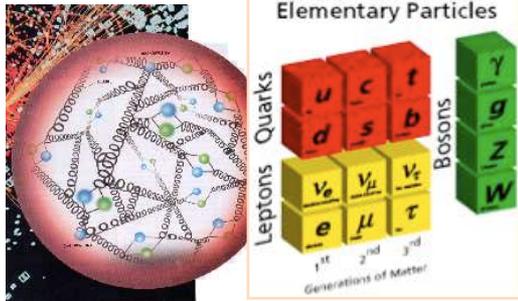
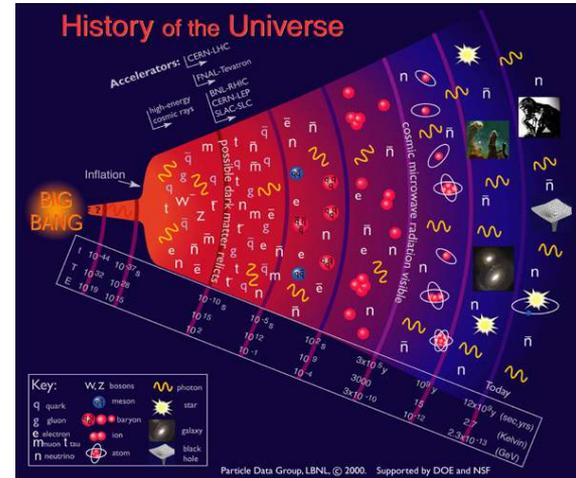


# LUMINOSITA' ED ENERGIA

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

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

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



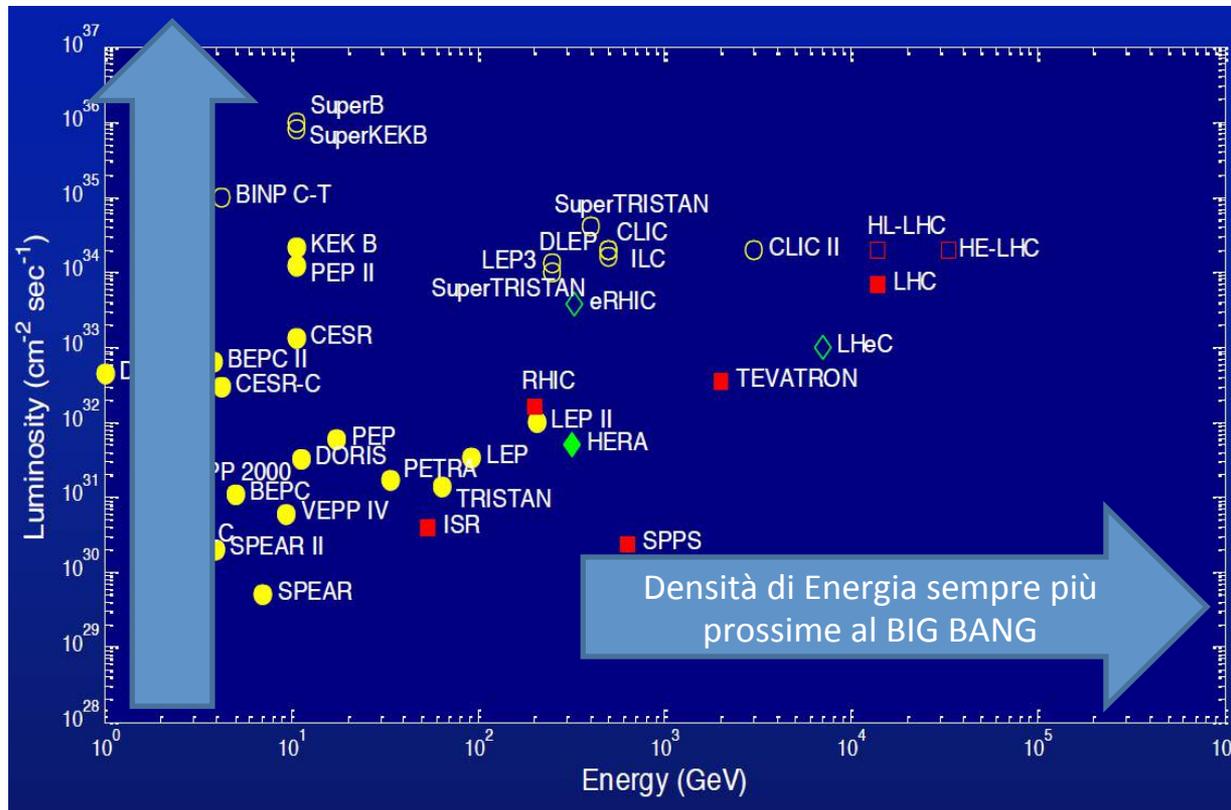
Quantità di eventi di fisica generati/statistica della misura

Numero di particelle per fascio

$$L = \frac{N_1 N_2}{4\pi\sigma_x \sigma_y} \times f_{collisione} [cm^{-2} s^{-1}]$$

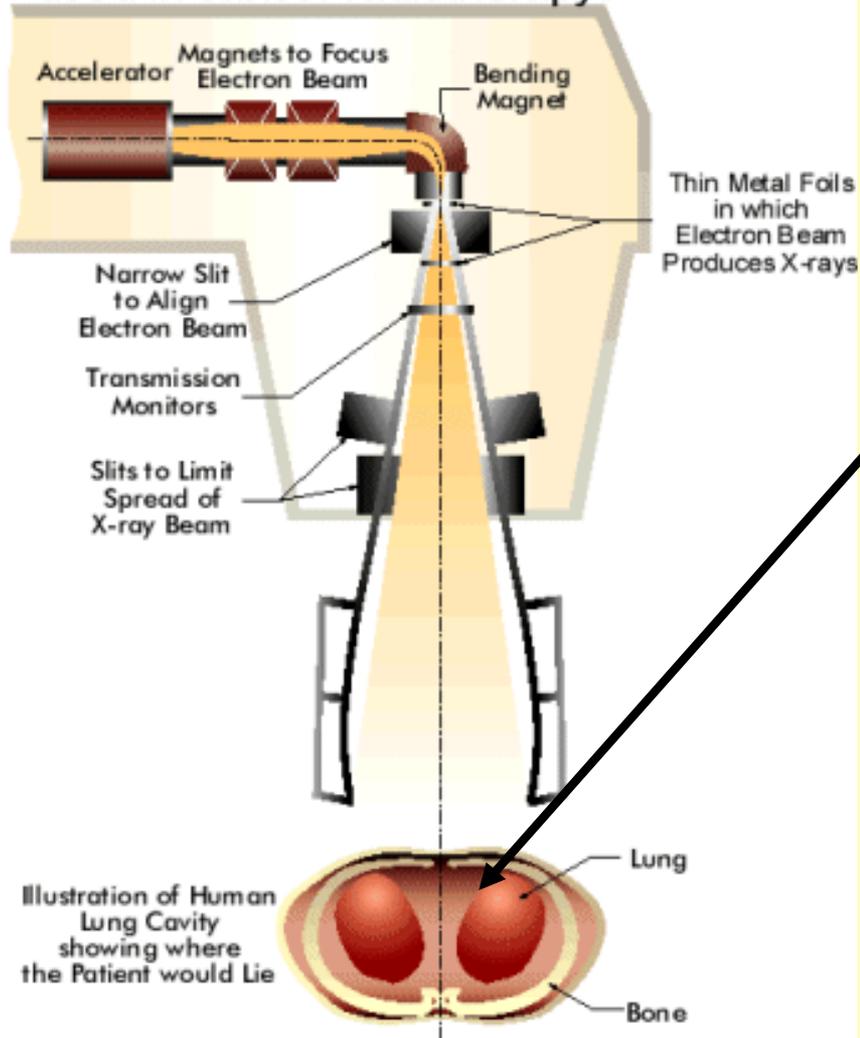
Dimensioni trasverse dei fasci nell'IP

In un collider la **frequenza con cui si producono gli eventi** cercati si può esprimere come il prodotto  $L \times \sigma$  ( $\sigma$ =sezione d'urto dell'evento cercato)



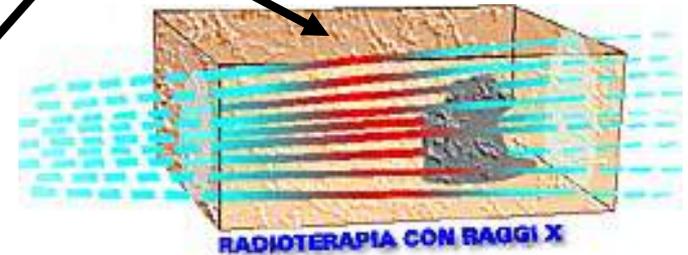
# Medicina: Radioterapia

Schematic diagram of a typical medical accelerator used in cancer radiotherapy.



Radiazione su cellule tumorali:  
molto localizzata, dose controllata.

I raggi X sono il trattamento per ora più usato.

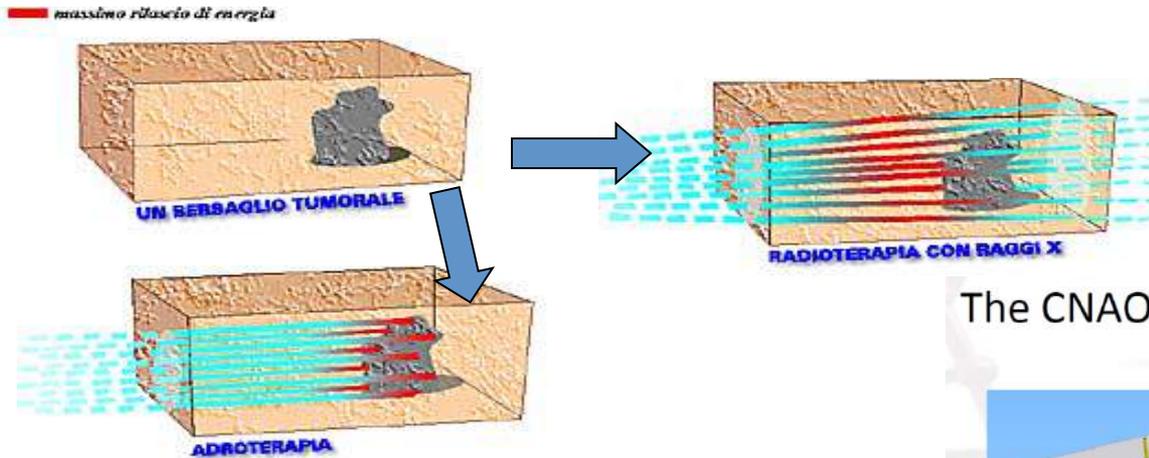


# Medicina: Adroterapia

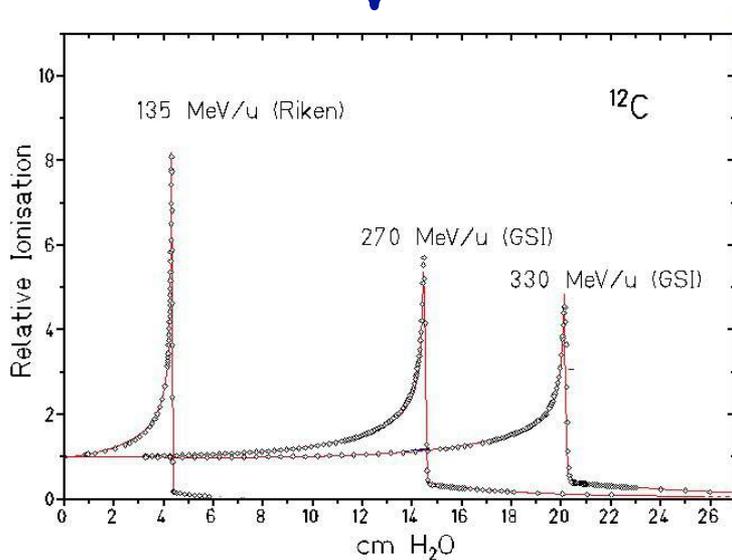
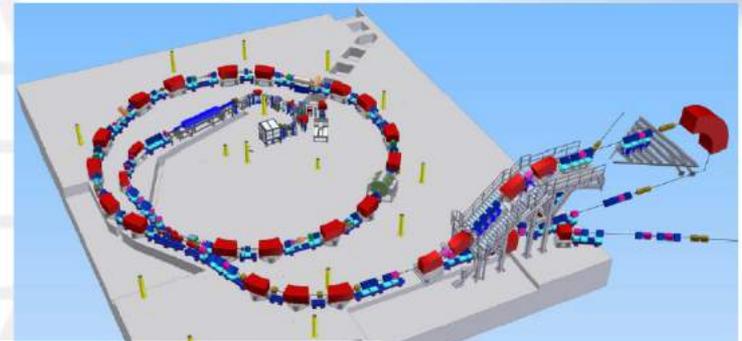
Terapia con protoni e ioni pesanti più efficace e più localizzata (risonanza di Bragg)

Centri in funzione: CNAO a Pavia, PSI a Zurigo, Loma Linda in California, Giappone,...

In costruzione con la collaborazione dell'INFN e LNF: CNAO a Pavia



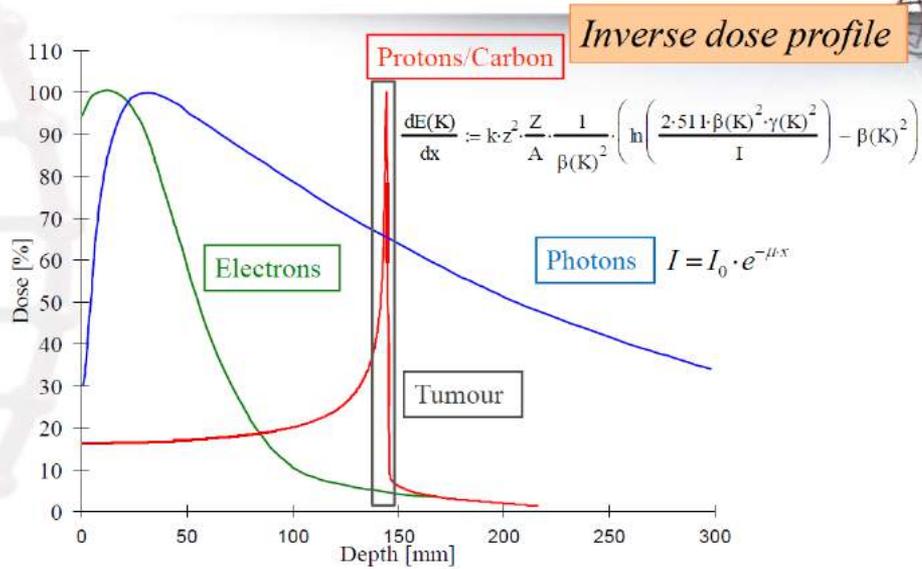
The CNAO accelerator and lines



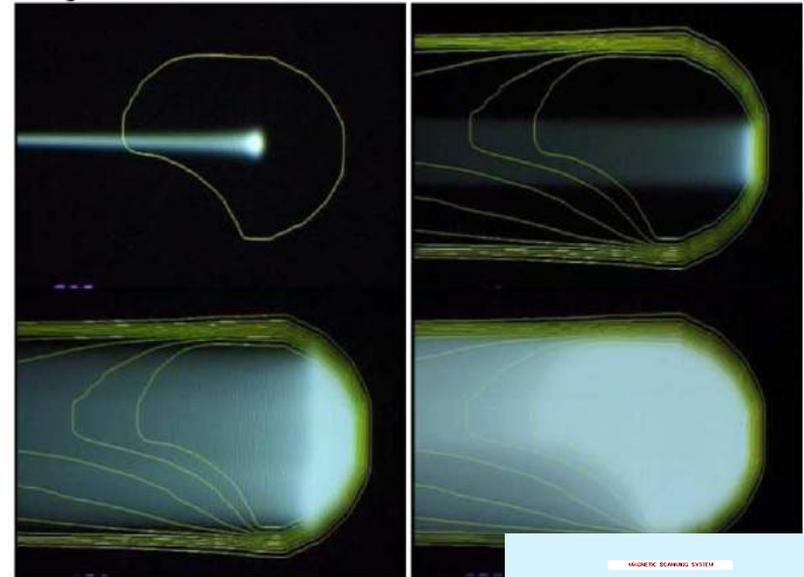
Courtesy M. Pullia

# Adroterapia: controllo attivo della dose

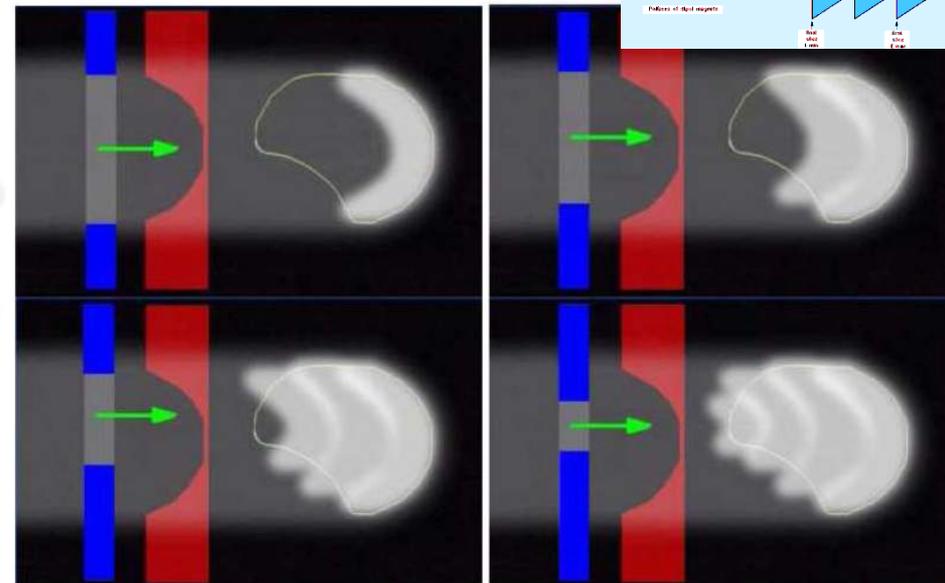
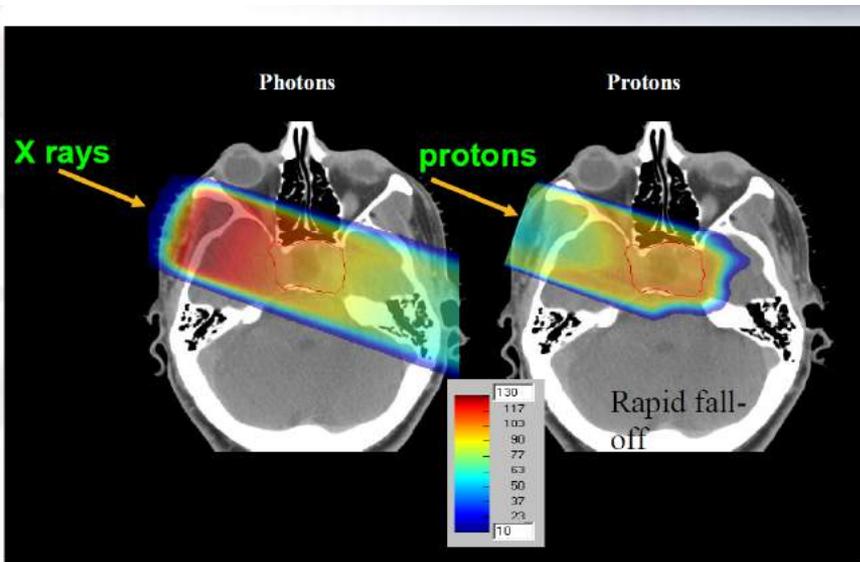
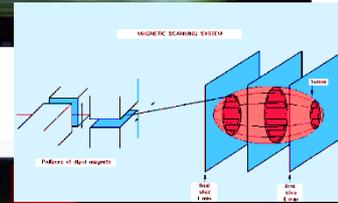
Comparison of the depth dose profiles



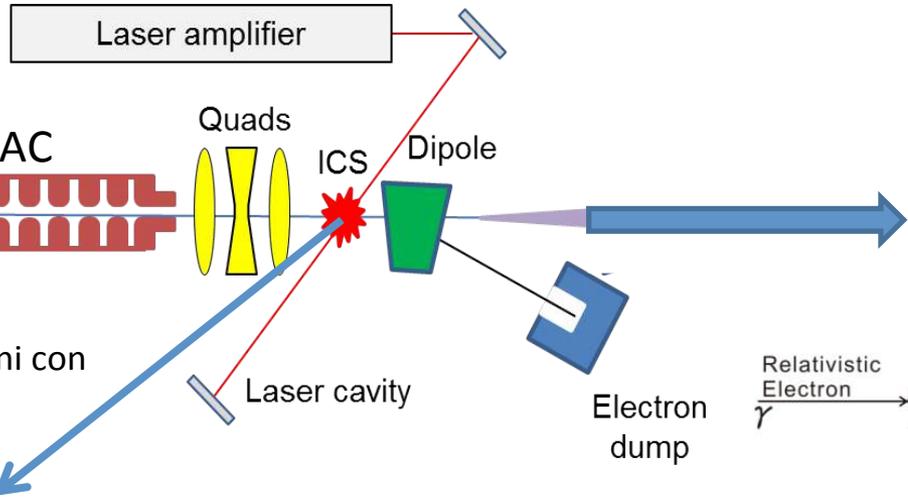
Courtesy M. Pullia



(Courtesy of E. Pedroni)

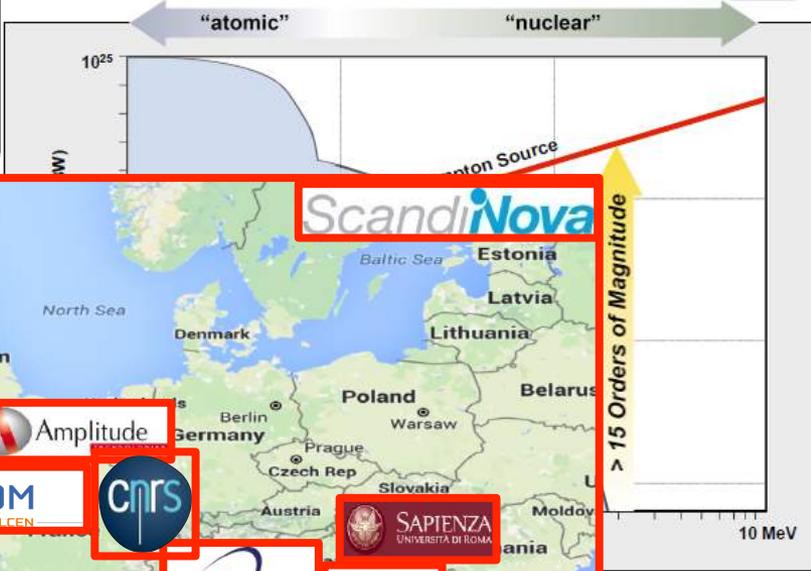
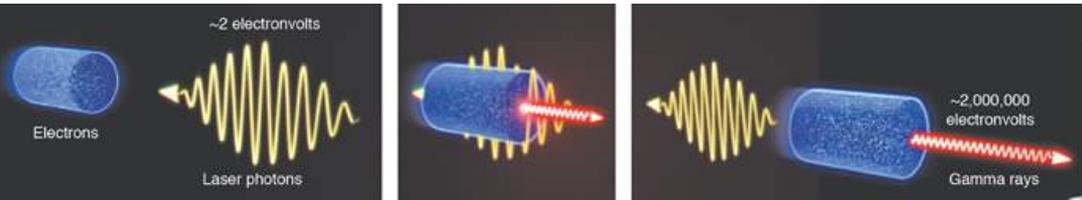
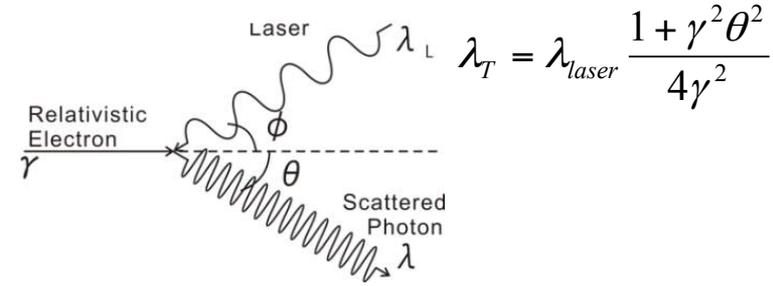


# SORGENTI DI RAGGI GAMMA



Radiazione X o  $\gamma$  (tunabile in energia!) in base all'energia degli elettroni e del laser incidente

Elettroni a 100-700 MeV  $\Rightarrow$  1-20 MeV di fotoni con laser a 500 nm



esy C. Barty



# LINEE DI RICERCA PRINCIPALI SUGLI ACCELERATORI DI PARTICELLE

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

**ALTI GRADIENTI ACCELERANTI**

**ALTA ENERGIA**

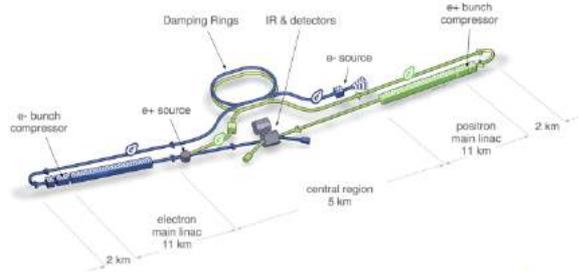
**ELEVATA QUALITA' DI FASCIO**

**INTENSITA' DEI FASCI DI PARTICELLE**

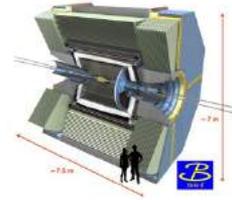
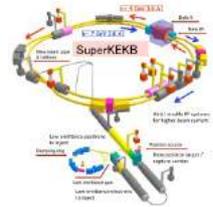
Macchine **compatte** anziché acceleratori chilometrici come sorgenti di radiazione (es FEL, acceleratori medicali,...).



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



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

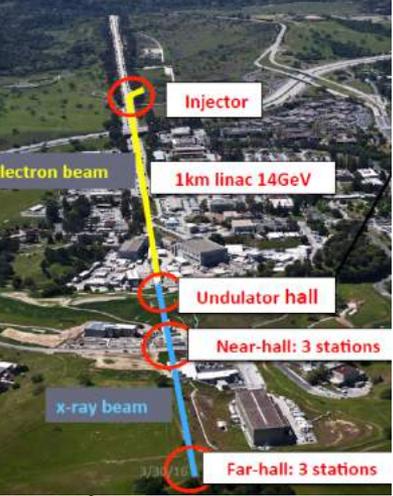


**Sorgenti di luce di sincrotrone di nuova generazione (ESRF upgrade)**

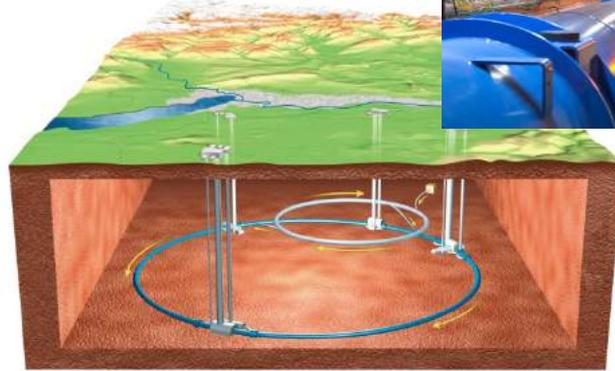


# LA NECESSITA' DI ELEVATI GRADIENTI ACCELERANTI

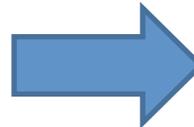
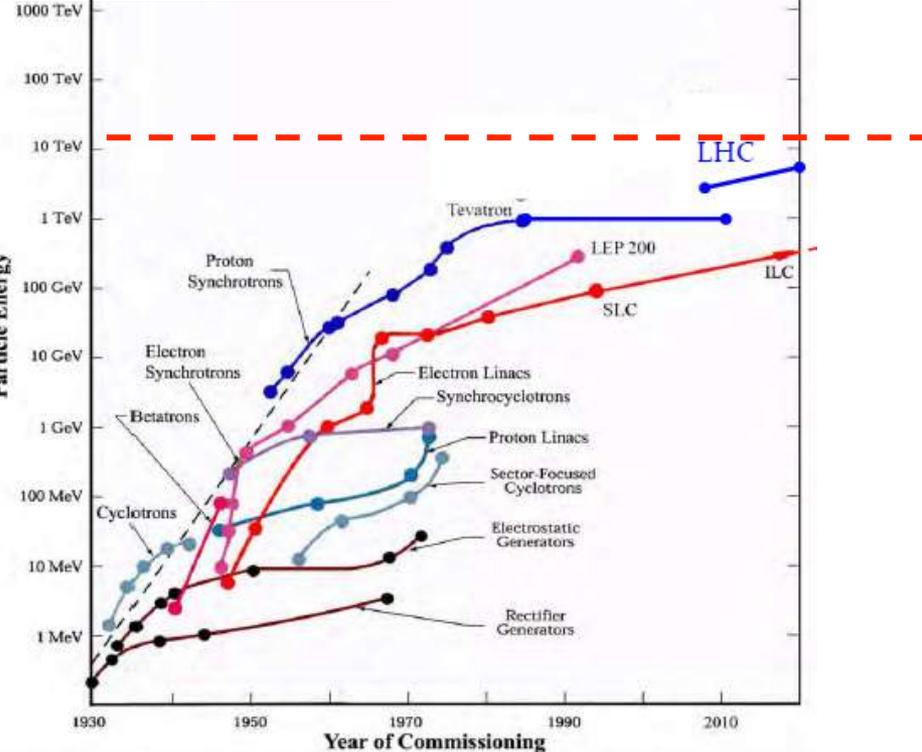
LCLS (1 km+ondulatori)



LHC (27 Km)



Senza una nuova tecnologia non c'è altra soluzione che andare verso macchine sempre più grandi



Hawking: the Solartron



# IL LIMITE DELLE MACCHINE CIRCOLARI AD ALTA

## ENERGIA

Macchine adroniche (p,...)

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

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

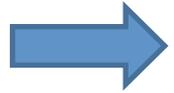


Con dipoli superconduttori si può pensare di arrivare a campi dell'ordine della 15-20 T (8 T LHC)

Con un investimento considerevole si potrebbe pensare di raddoppiare circa l'energia di LHC utilizzando lo stesso tunnel

Macchine leptoniche (collider e +,e-)

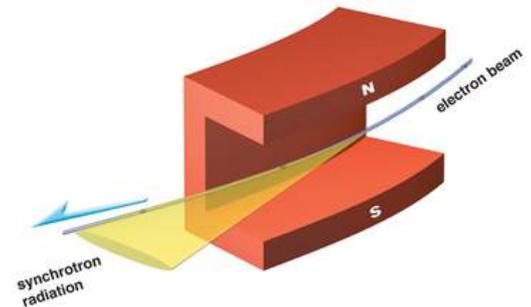
Utilizzate per misure di precisione ad elevata luminosità



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

$$U_{per\ giro} = \frac{e^2}{3\epsilon_0} \frac{\gamma^4}{\rho}$$

Una elettrone a 200 GeV nel tunnel di LHC perde decine di GeV in un giro!

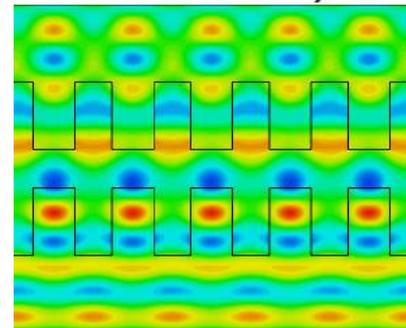
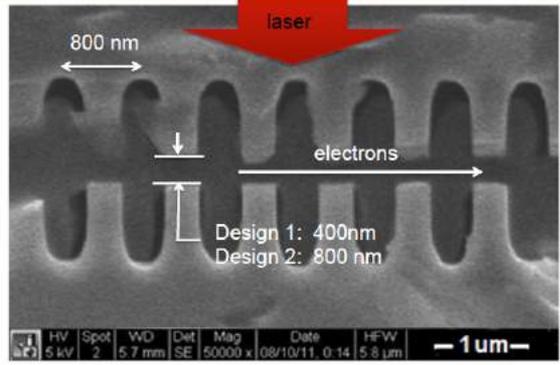
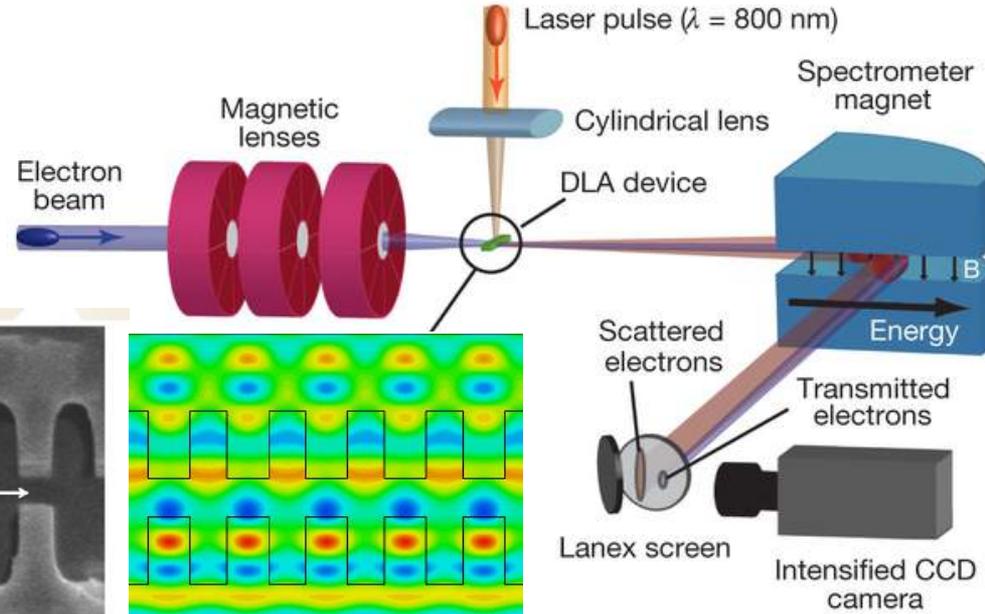
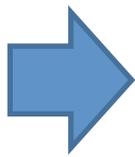


# STRUTTURE DIELETTRICHE ALIMENTATE DA LASER (DLA)

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



Nature 503, 91-94 (2013).

Questo tipo di ricerca va nella direzione della miniaturizzazione di sorgenti di radiazione come FEL

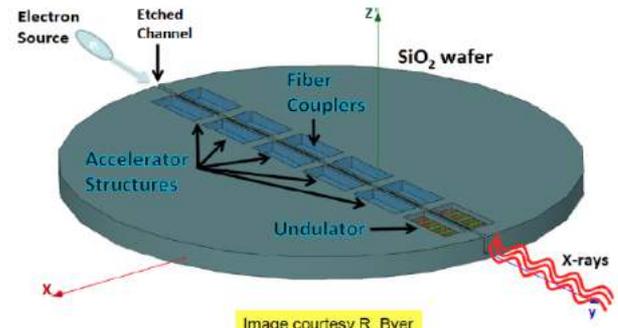
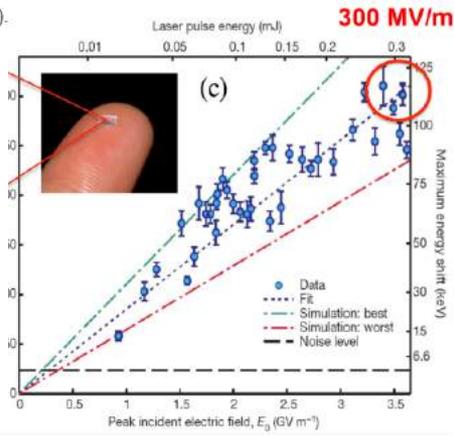


Image courtesy R. Byer

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



**VIDEO**

Courtesy E. Peralta, J. England

# Frontiere nell'accelerazione: acceleratori a plasma

RF Cavity



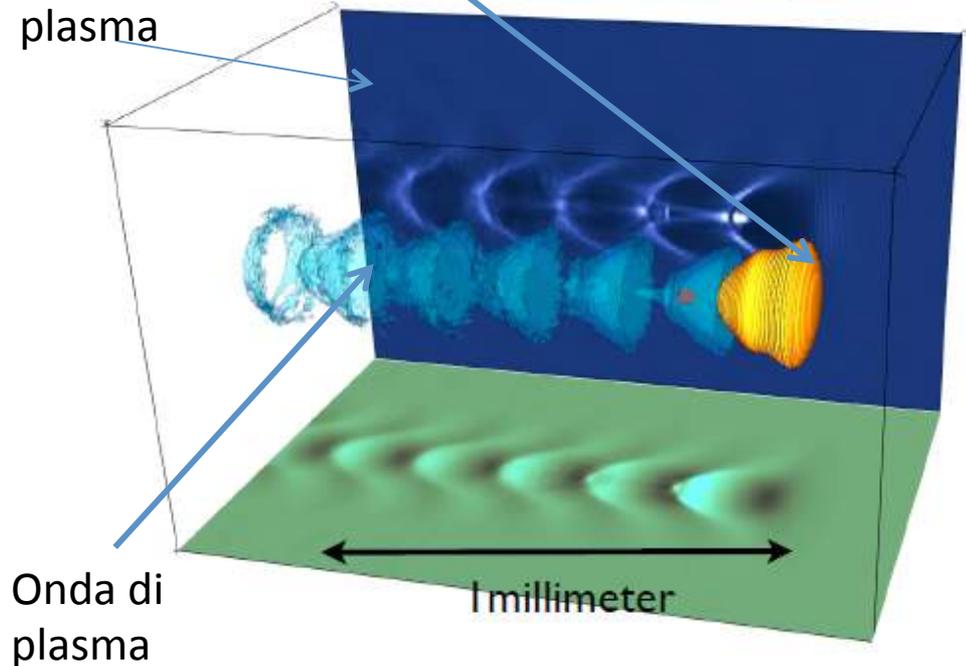
1 meter

Campo elettrico  $< 100$  MV/m

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

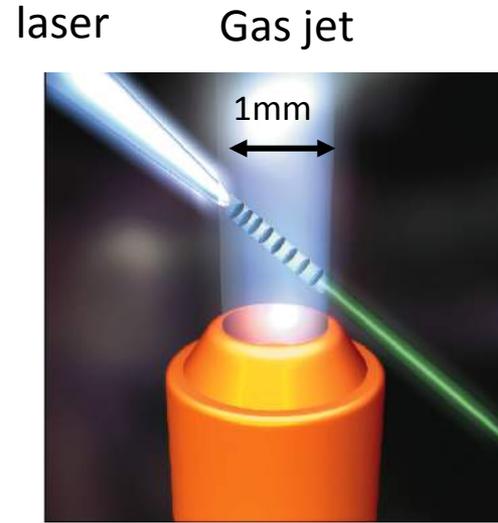
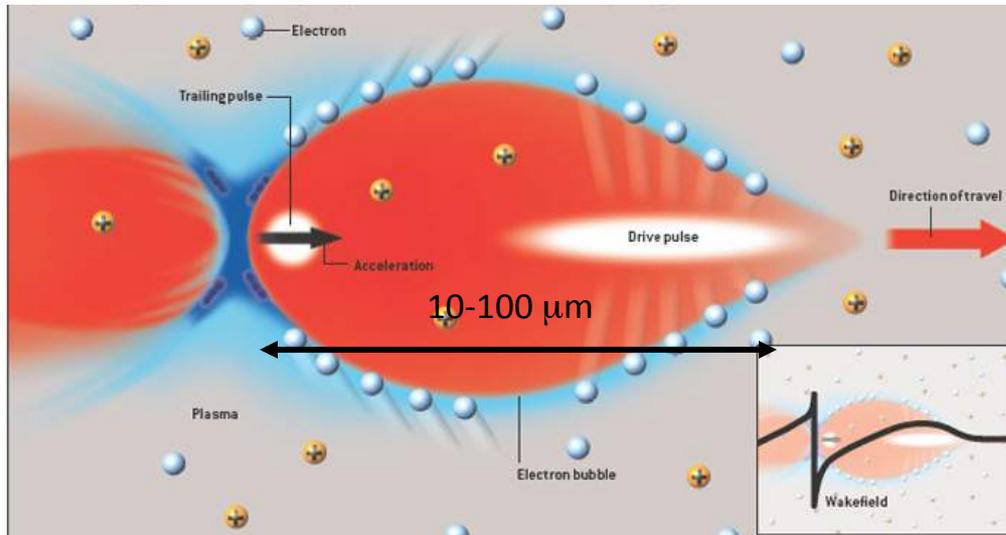
Impulso laser o pacchetto di elettroni che genera l'onda di plasma

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

# ACCELERAZIONE LASER-PLASMA (LWFA)



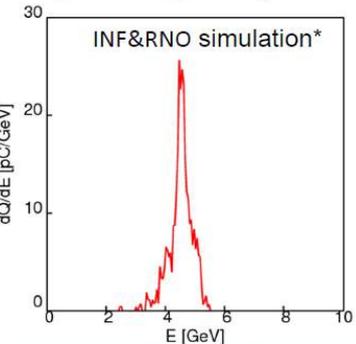
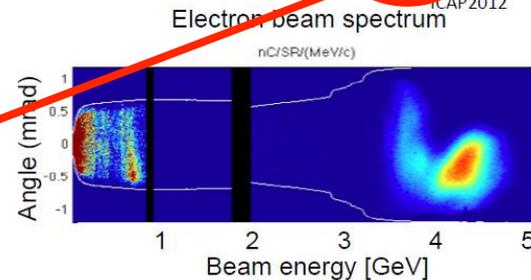
VIDEO

Elettroni accelerati

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

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

\*C. Benedetti et al., proceedings of AAC2010, proceedings of CAP2012



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

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

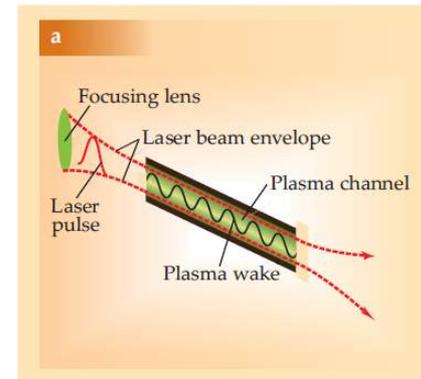
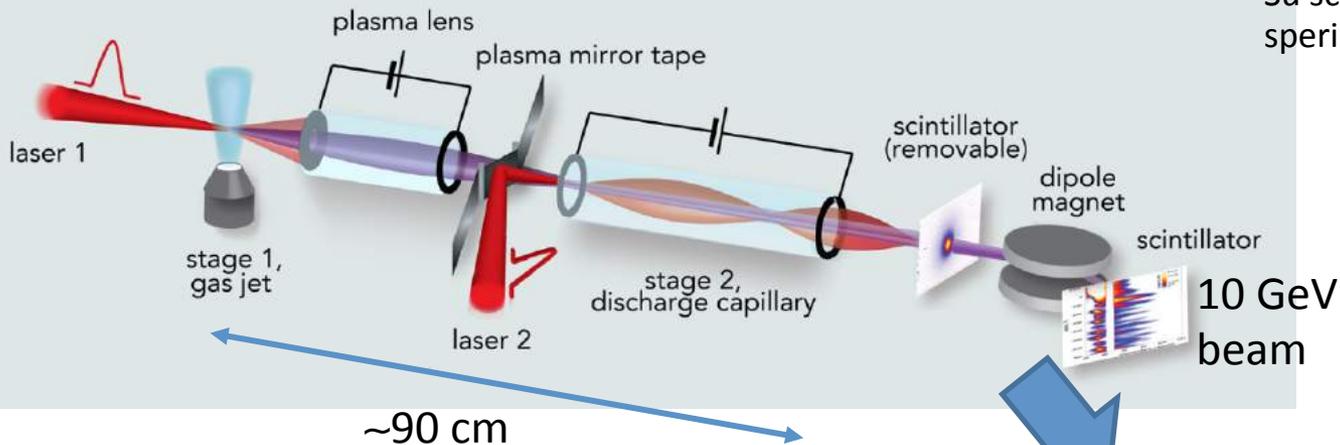
W.P. Leemans et al., PRL 2014

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

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

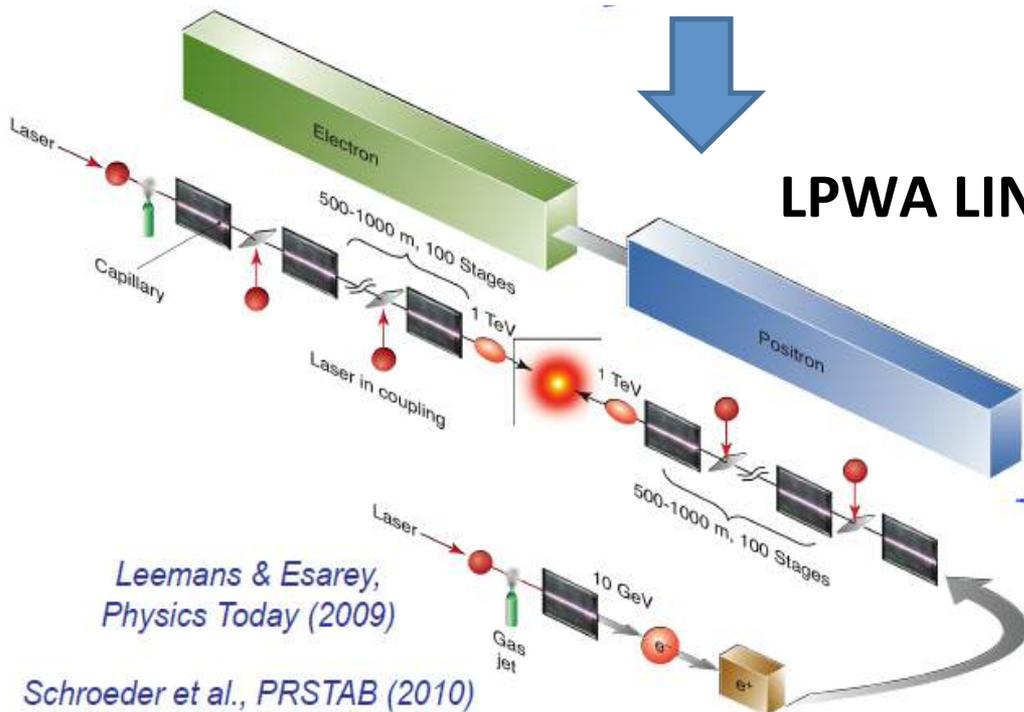
# ACCELERAZIONE LASER-PLASMA: MULTI-GeV LINAC

Su scala ridotta ci sono già dei risultati sperimentali



**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)

Leemans & Esarey,  
Physics Today (2009)

Schroeder et al., PRSTAB (2010)

# SORGENTI DI RADIAZIONE COMPATTE BASATE SU

Nonlinear Thomson  
2003

Betatron radiation  
2004

Compton scattering  
2011

Bremsstrahlung  
2010

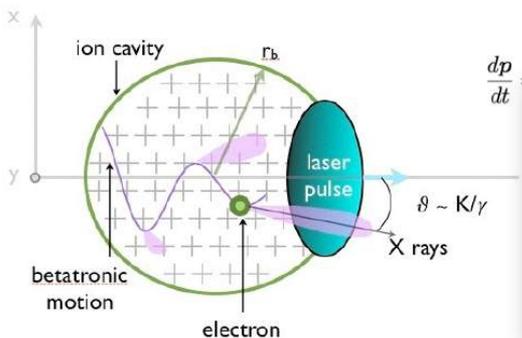
1 keV

10 keV

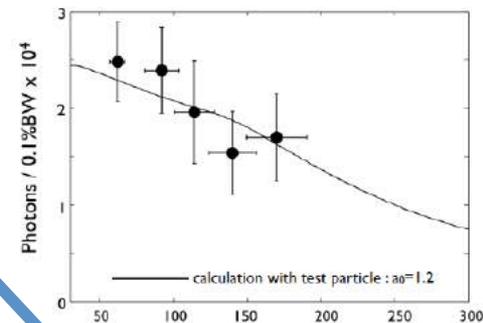
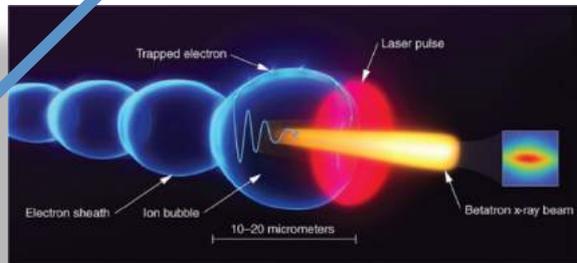
100 keV

1 MeV

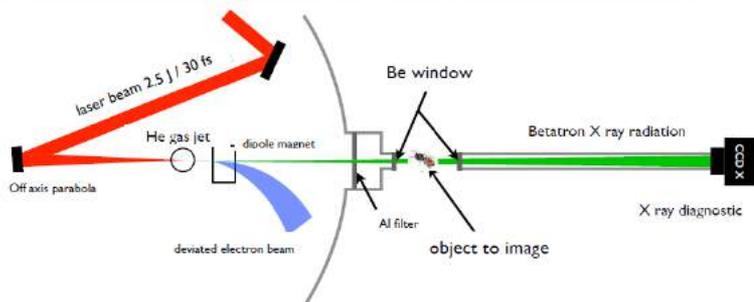
10 MeV



$$\frac{dp}{dt} =$$



## X ray Phase Contrast Radiography: Experiments

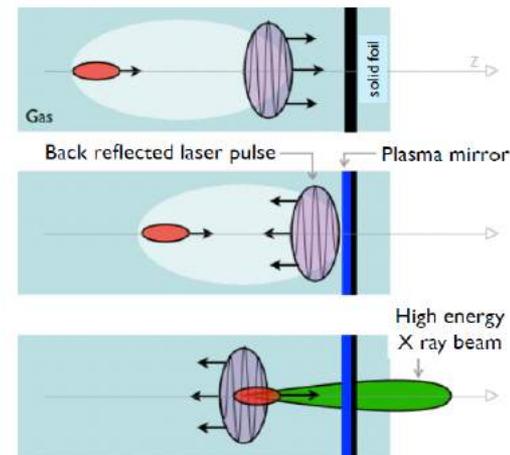
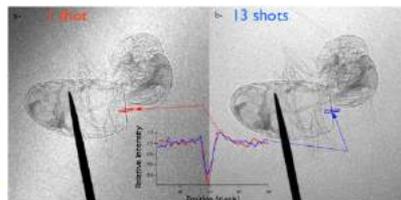


Parameters of the source :

- $E_c = 12.3$  keV
- $2.2 \times 10^8$  photons/0.1%BW/sr/shot at 10 keV
- $N = 10^9$  photons in 28 mrad (FWHM) divergence beam

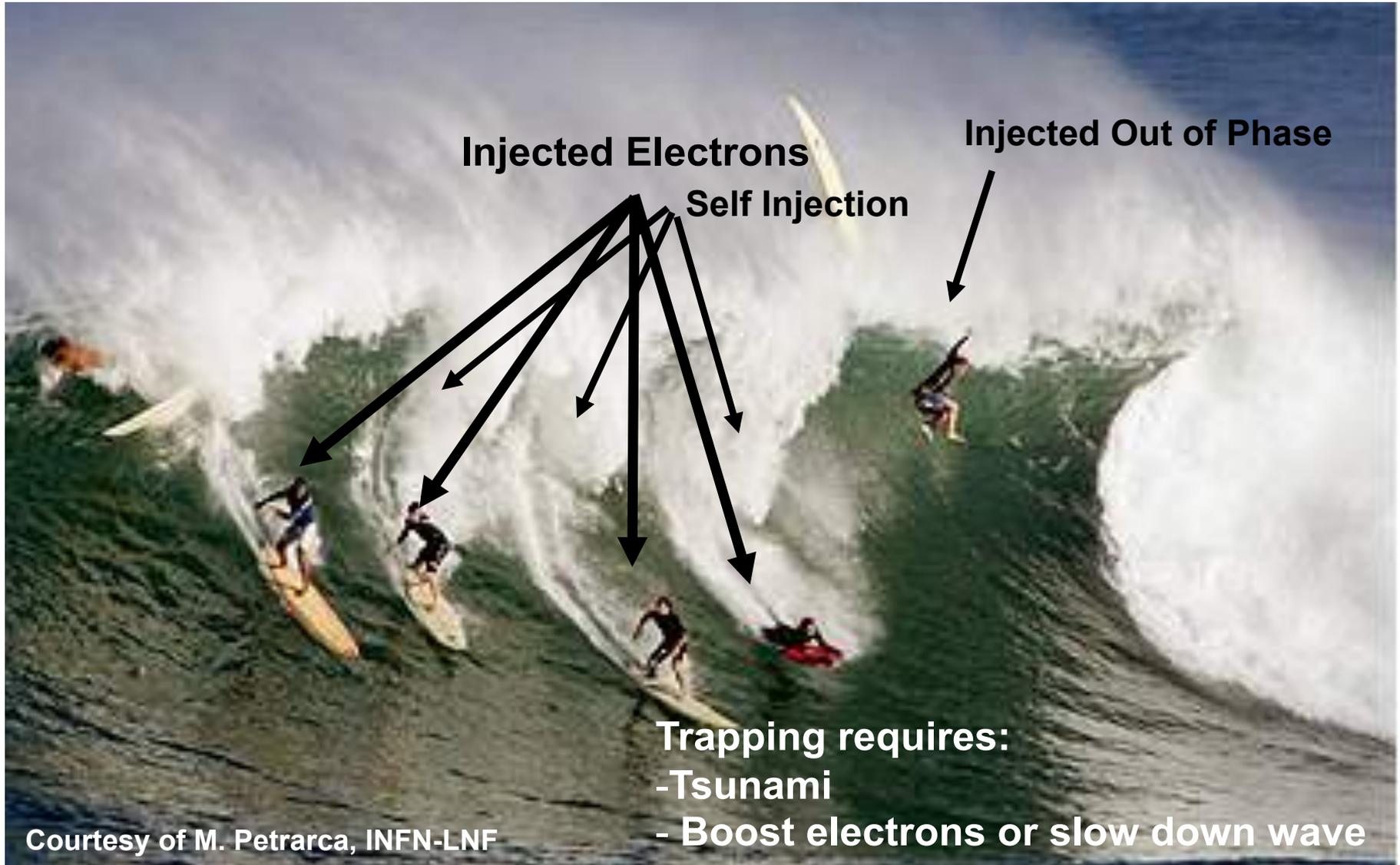
S. Fourmaux et al., Opt. Lett. 36, 2426 (2011)

The 6th International Conference "Charged & Neutral Particles Channeling Phenomena - Channeling 2014, Capri, Italia, October 5-10 (2014)

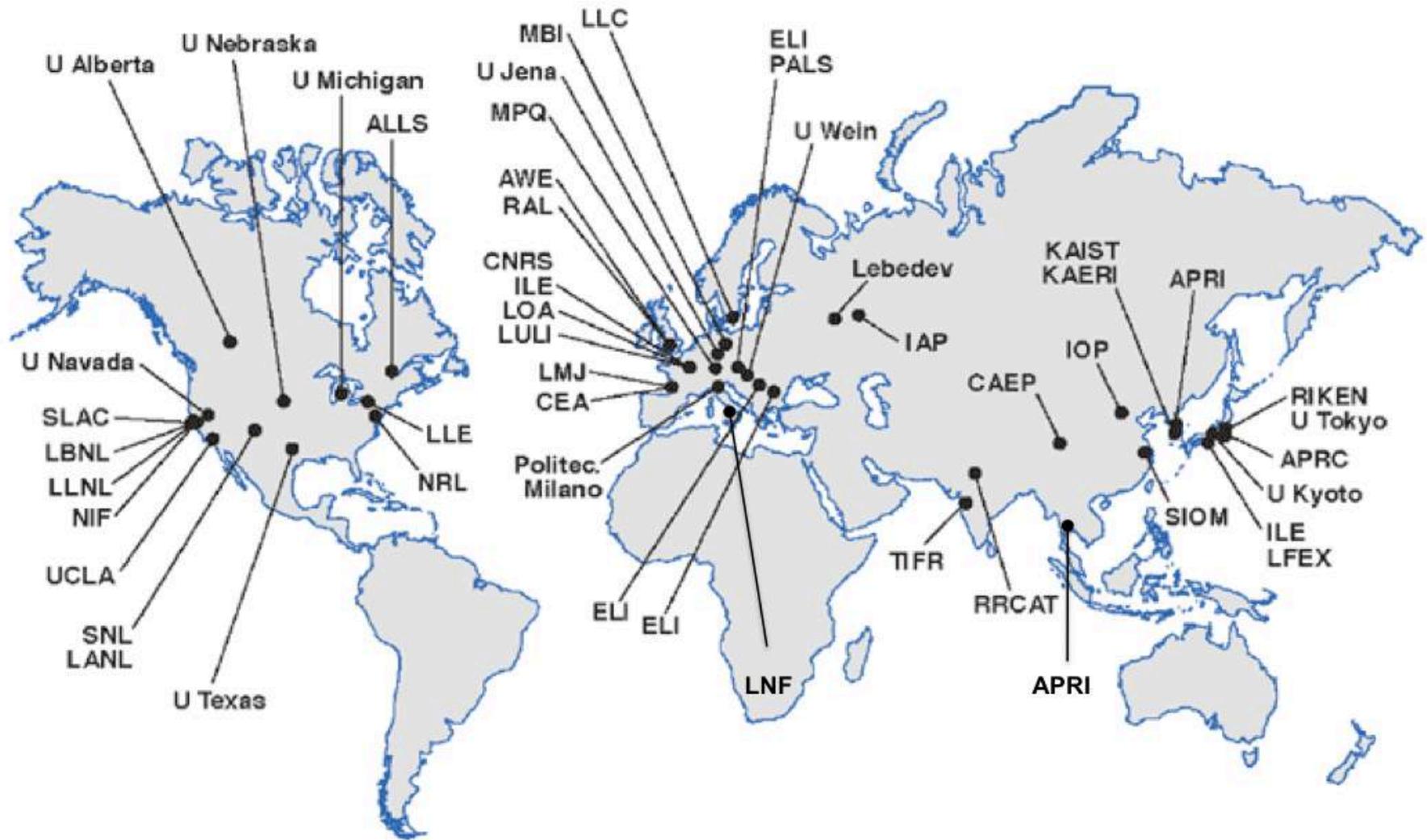


Courtesy V. Malka

# Accelerazione al plasma

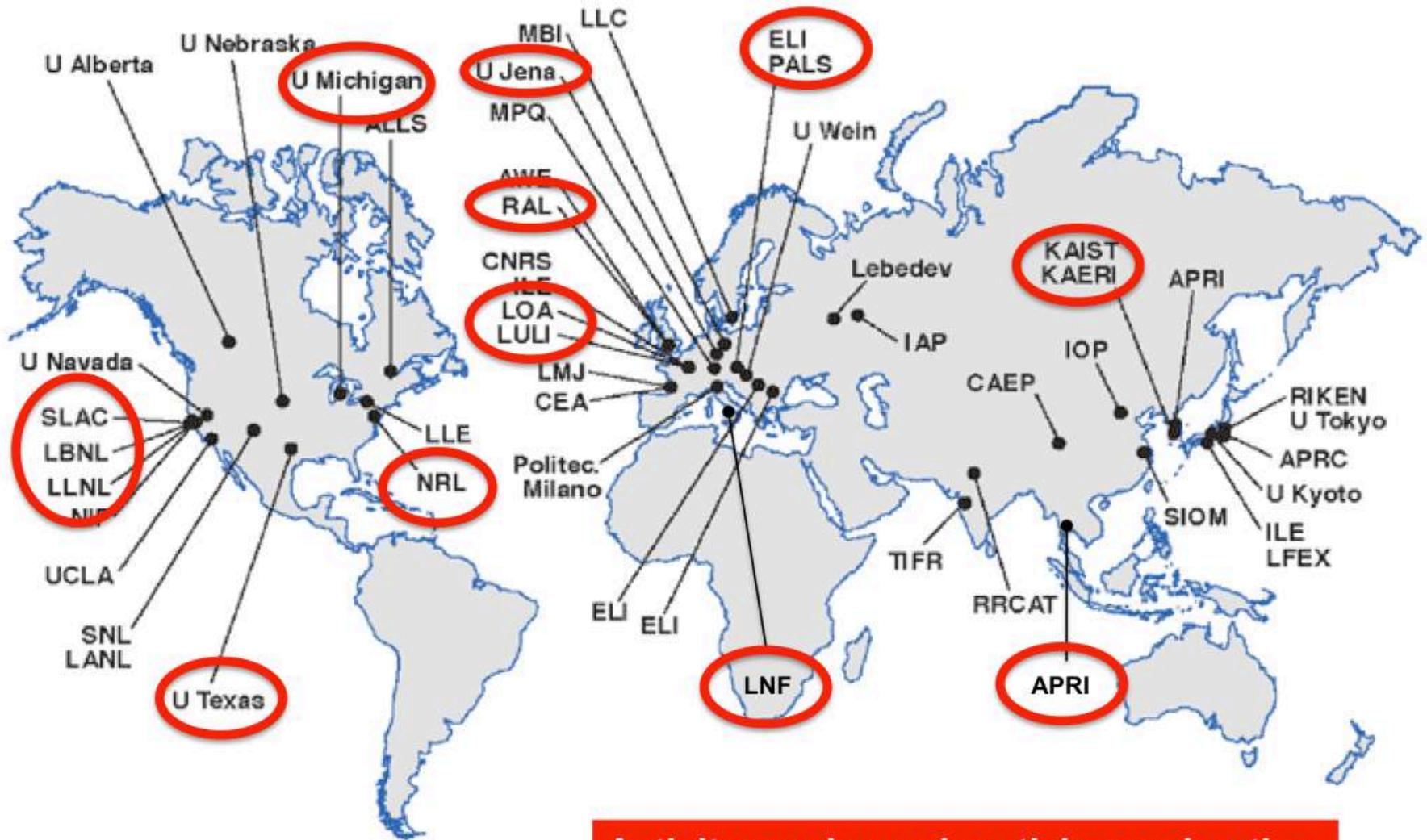


# ULTRA-HIGH INTENSITY LASER FACILITIES



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

# ULTRA-HIGH INTENSITY LASER FACILITIES



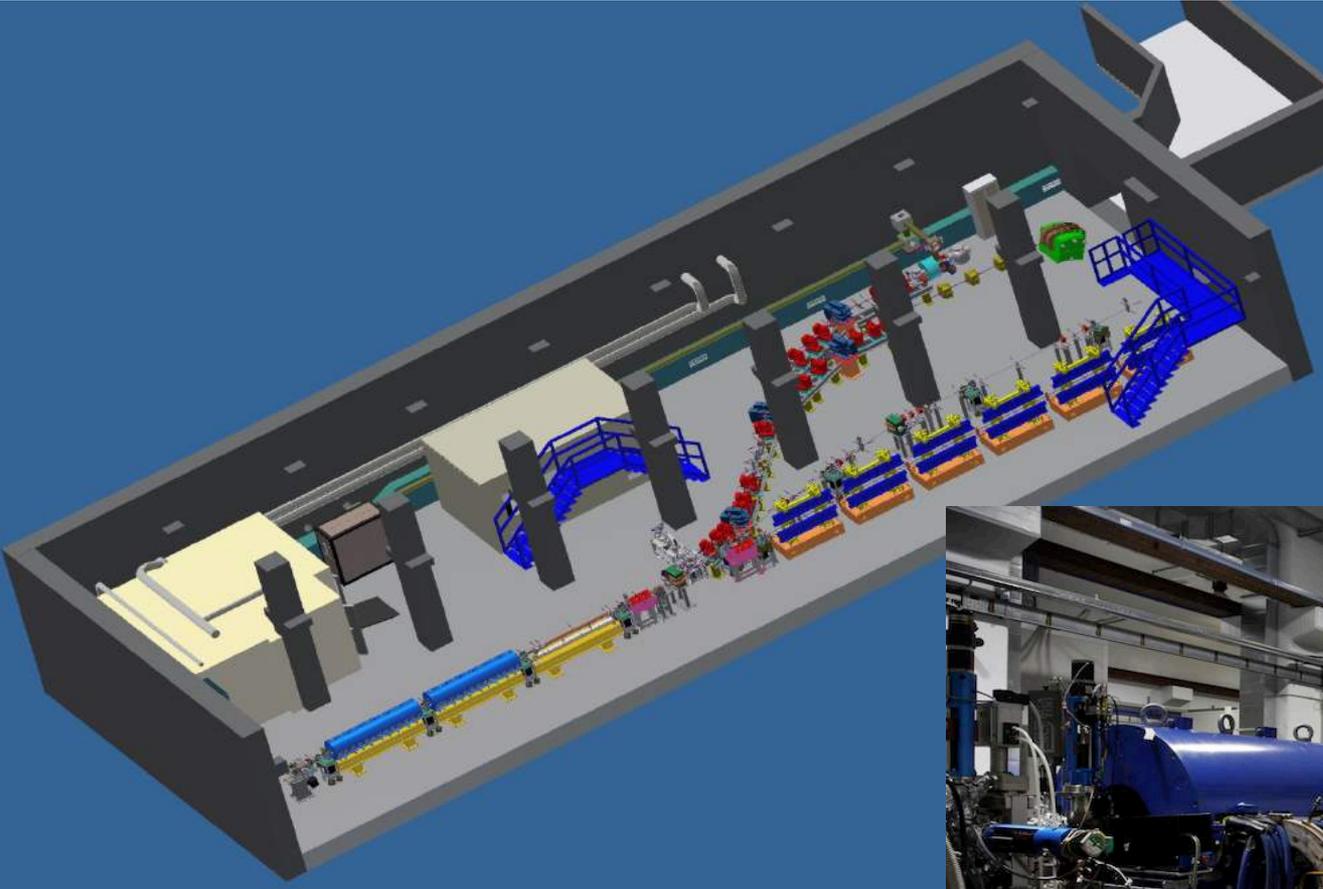
<http://www.icuil.org/>

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.



# 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>

# Ringrazio...

A. Mostacci e A. Cianchi per tutto il materiale che mi hanno fornito

Parte del materiale presentato è stato preso/riadattato da precedenti presentazioni di C. Milardi, M. Ferrario, M. Boscolo, A. Gallo, che ringrazio.

**... e voi per la vostra attenzione!!**