

A photograph of particle accelerator components, showing a series of large, curved, metallic structures arranged in a row. The structures are illuminated with blue and purple light, creating a futuristic and scientific atmosphere. The background is dark, making the glowing components stand out.

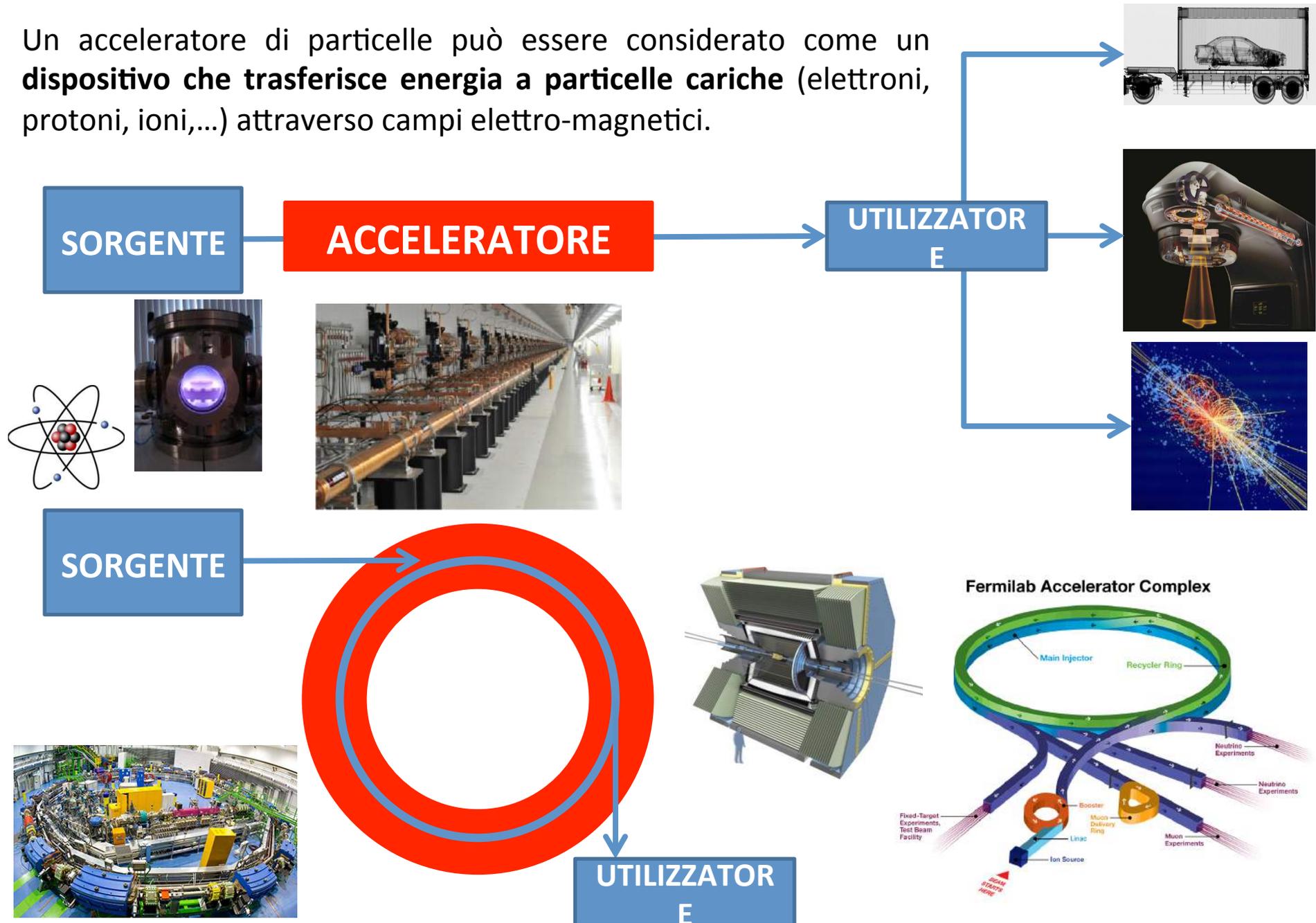
# Gli acceleratori di particelle: da microscopi subatomici a strumenti per la medicina

*David Alesini  
(LNF-INFN, Frascati)*

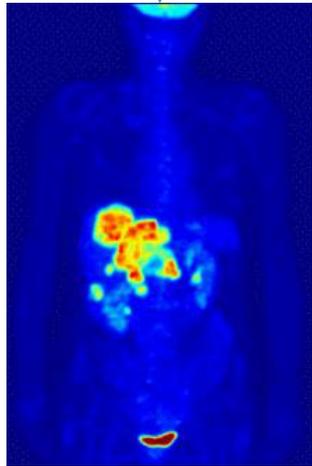
**Stages Estivi-Residenziali 2017**

# COME FUNZIONANO GLI ACCELERATORI DI PARTICELLE?

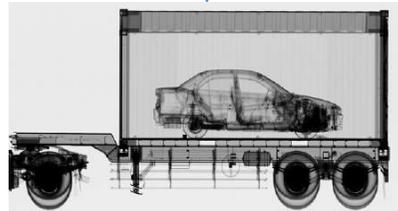
Un acceleratore di particelle può essere considerato come un **dispositivo che trasferisce energia a particelle cariche** (elettroni, protoni, ioni,...) attraverso campi elettro-magnetici.



# A COSA SERVONO GLI ACCELERATORI DI PARTICELLE?



Produzione di radioisotopi



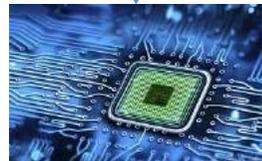
sicurezza



sterilizzazione



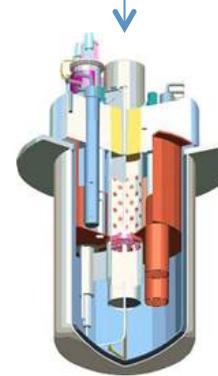
Radioterapia e Adroterapia



Impiantazione ionica



Trattamento materiali



Reattori a fissione controllati



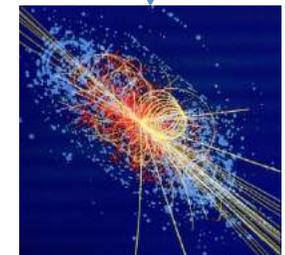
Studi di materiali per fusione nucleare



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

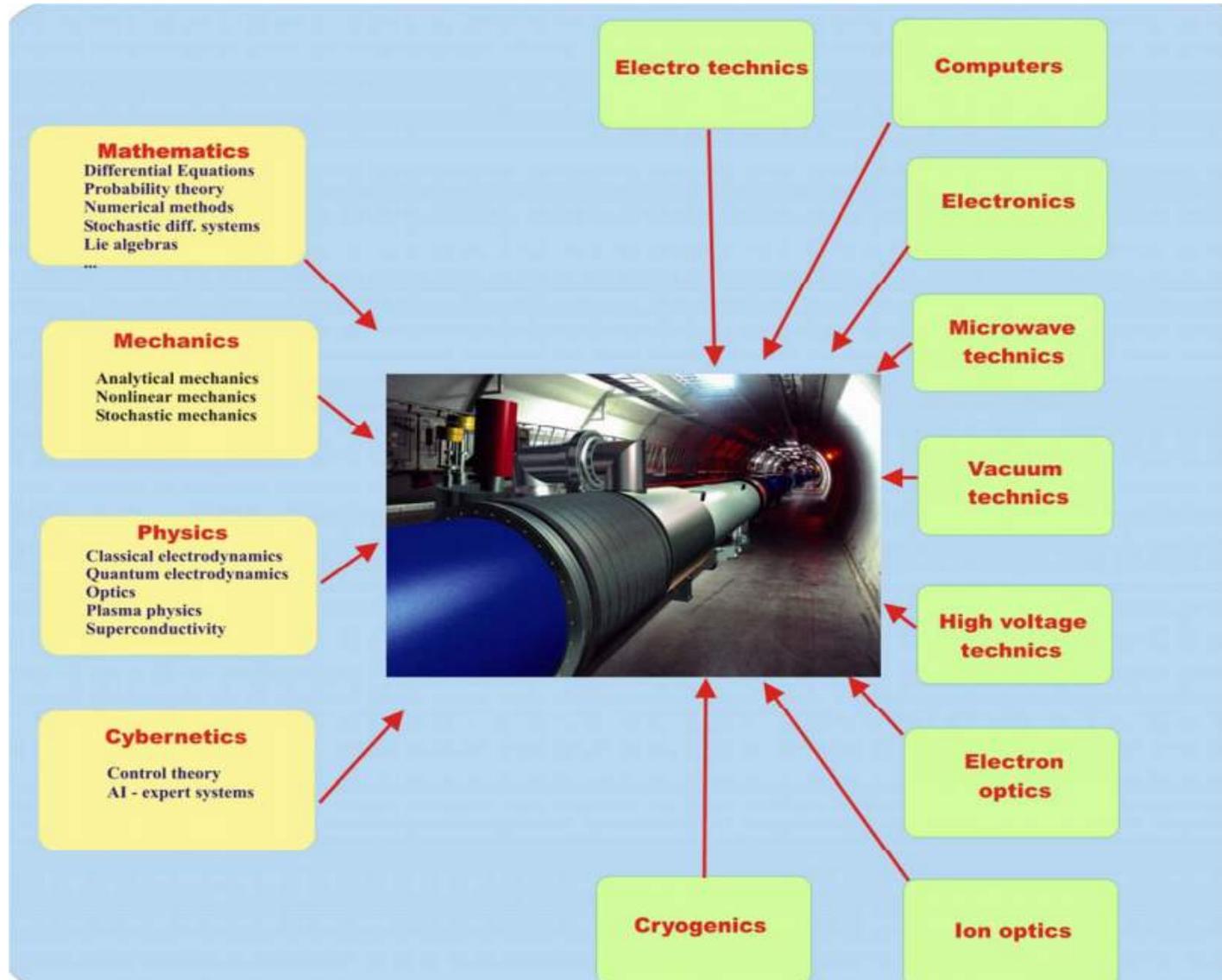


Sorgenti di neutroni



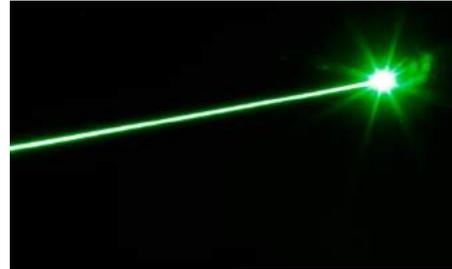
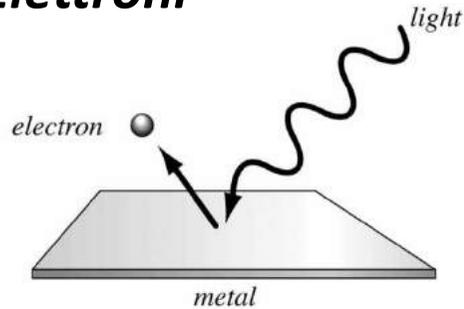
Fisica delle alte energie

# INTERDISCIPLINARIETÀ DELLA FISICA E TECNOLOGIA DEGLI ACCELERATORI DI PARTICELLE

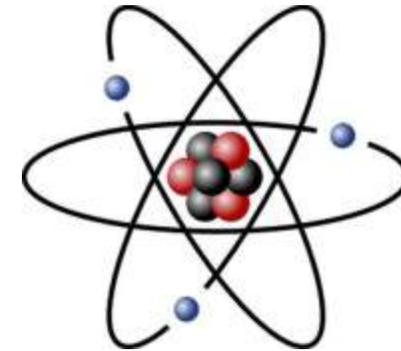
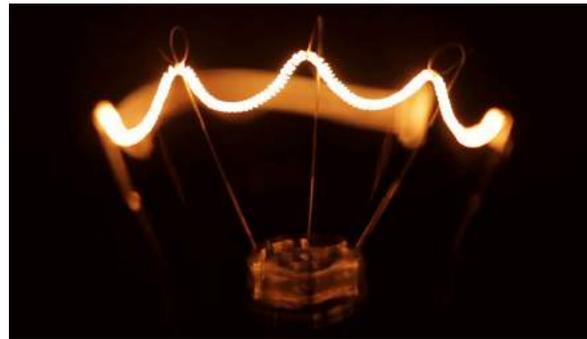
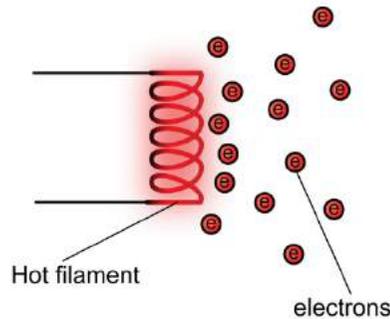


# SORGENTI DI PARTICELLE

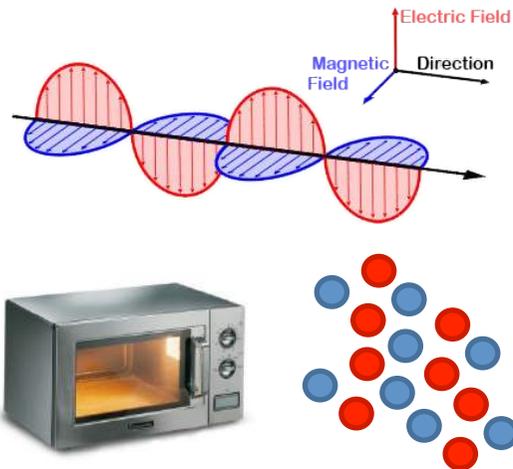
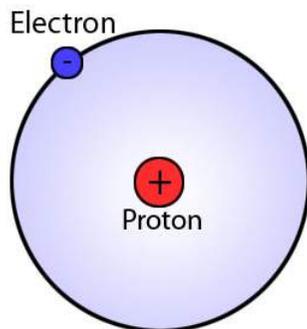
## Electroni



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



## Protoni



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

# 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*.

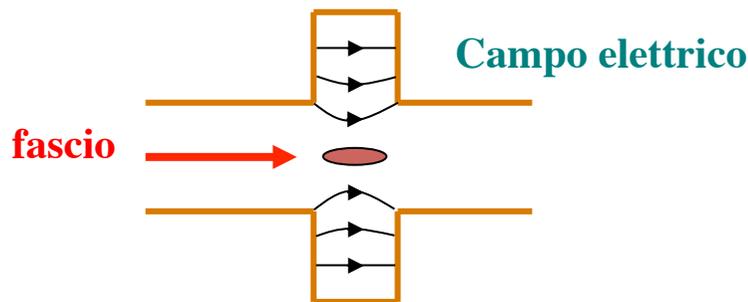
L'equazione base per la descrizione del processo di accelerazione e foccheggiamento, deflessione è rappresentata dalla *Forza di Lorentz*.

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

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

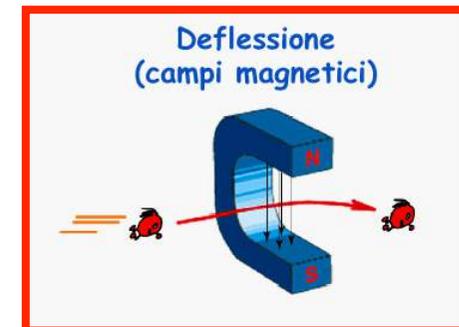
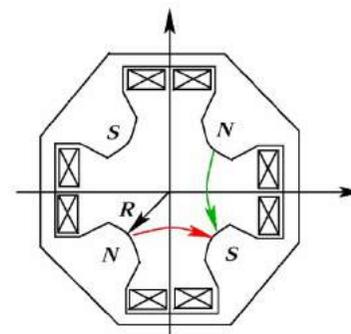
ACCELERAZIONE

$\vec{E}$  = campo elettrico



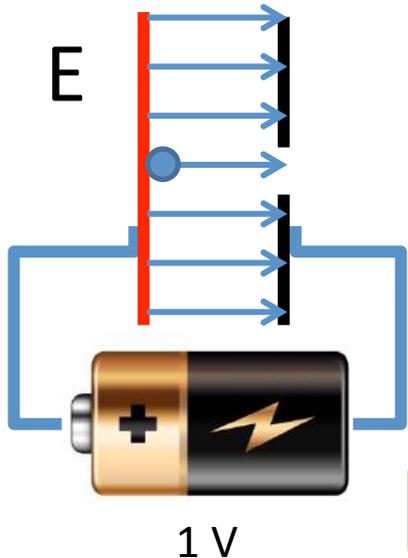
CURVATURA E FOCHEGGIAMENTO

$\vec{B}$  = campo magnetico



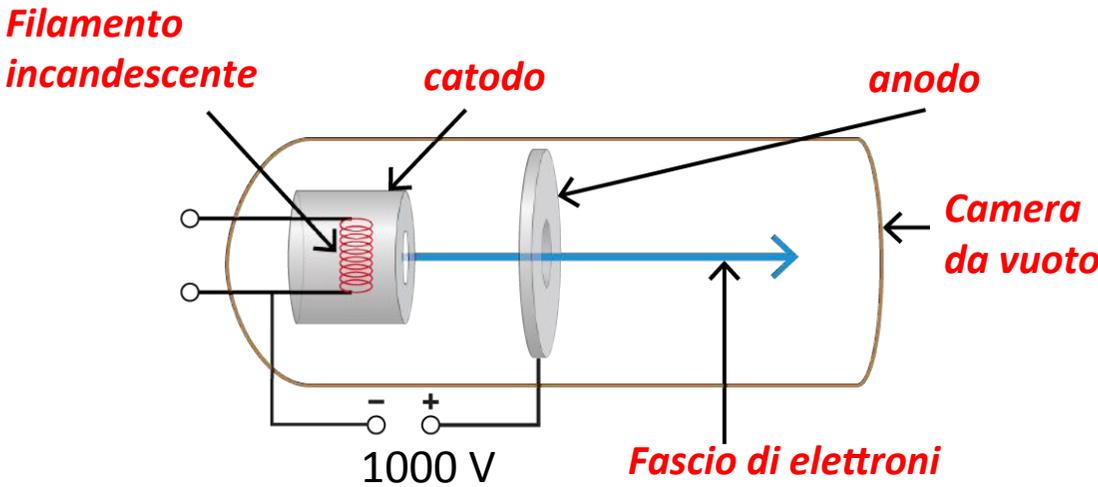
# ACCELERAZIONE DI PARTICELLE: CAMPO ELETTRICO

Le particelle vengono accelerate con l'utilizzo di campi elettrici

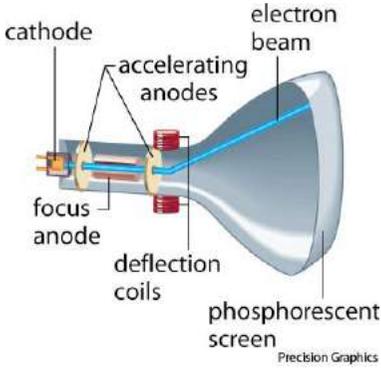


Guadagno di Energia  $\propto$  ddp (V)

$10^9$  V



220 V

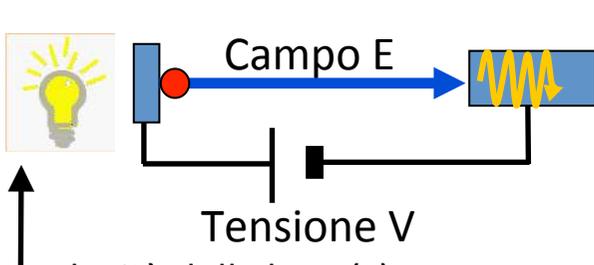


$10^5$  V

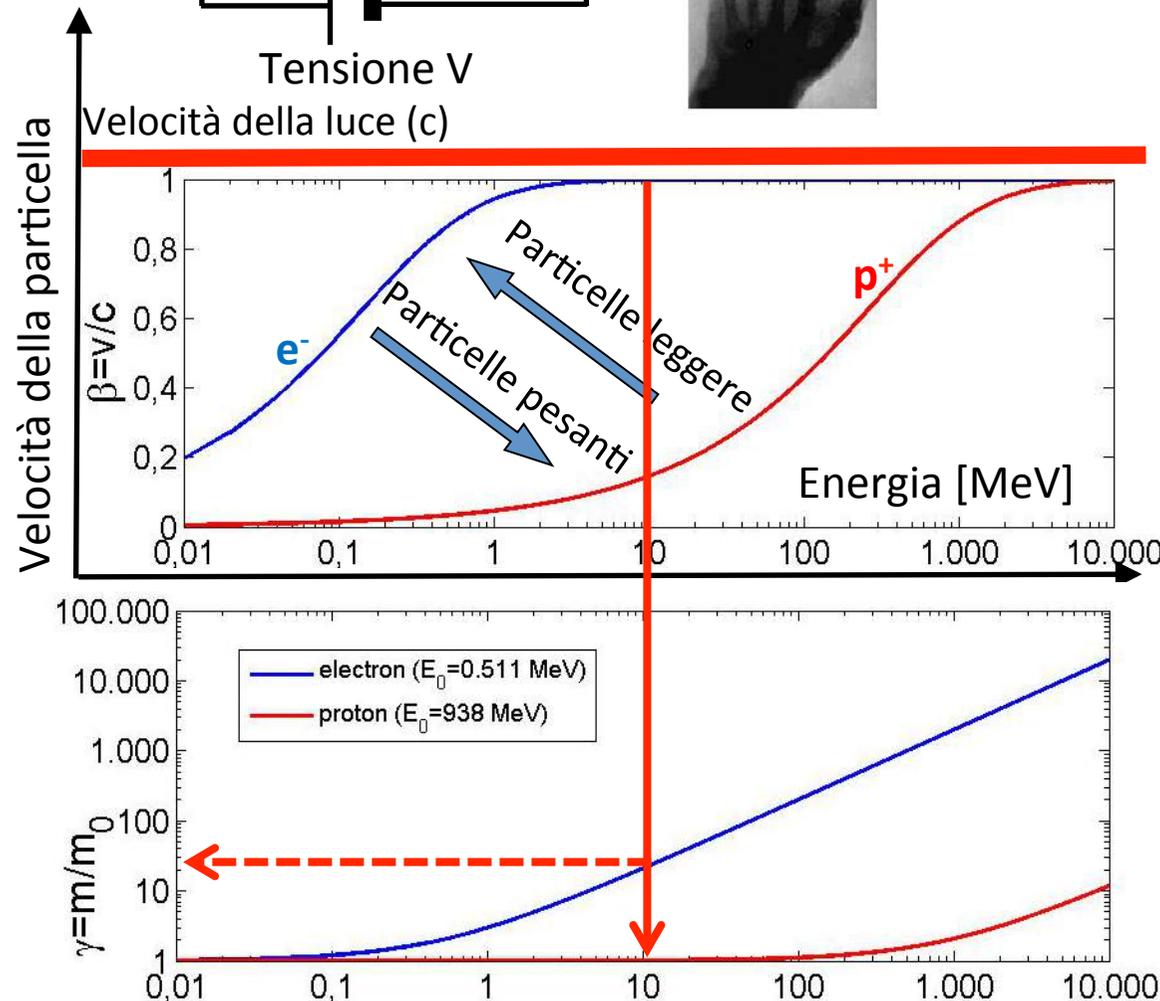


# ENERGIA E VELOCITA' DELLE PARTICELLE

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  $e^-$  producevano raggi X.



**Bertha  
Röntgen's Hand  
8 Nov, 1895**



⇒ l'elettrone viene frenato dagli atomi (decelera) e diventa sorgente di onde elettromagnetiche (**raggi X**)

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

⇒ Unità di misura piccolissima ( $1\text{eV} \sim 10^{-19}$  J)

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

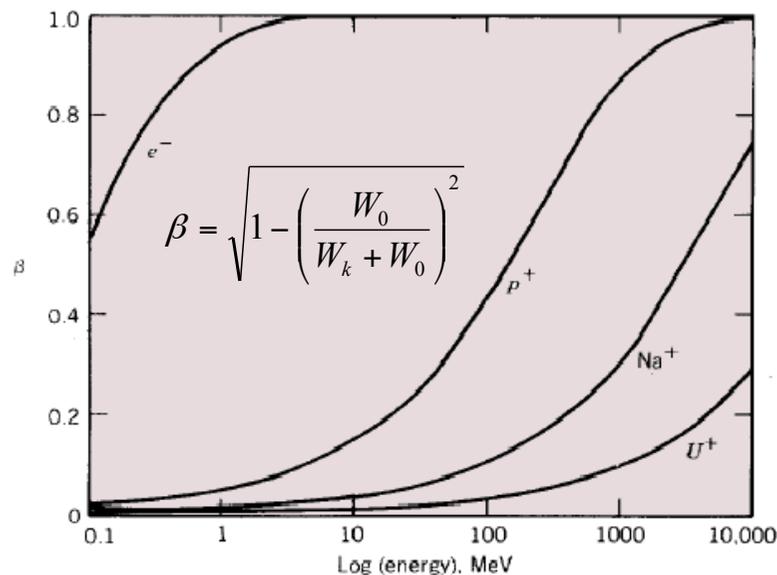
⇒ Un **elettrone** diviene relativistico (la sua velocità è prossima a c quando la sua  $E > 5$  MeV ( $m_e = 9 \times 10^{-31}$  kg)

⇒ Un **protone** ha bisogno di un'energia 1000 volte più alta ( $m_p = 1.6 \times 10^{-27}$  kg)

⇒ 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>II Principio della Dinamica</b>		<b>Forza di Lorentz</b>		
$\vec{F} = \frac{d}{dt} \vec{p} = \frac{d}{dt} (m \vec{v})$		$\vec{F} = q (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$		



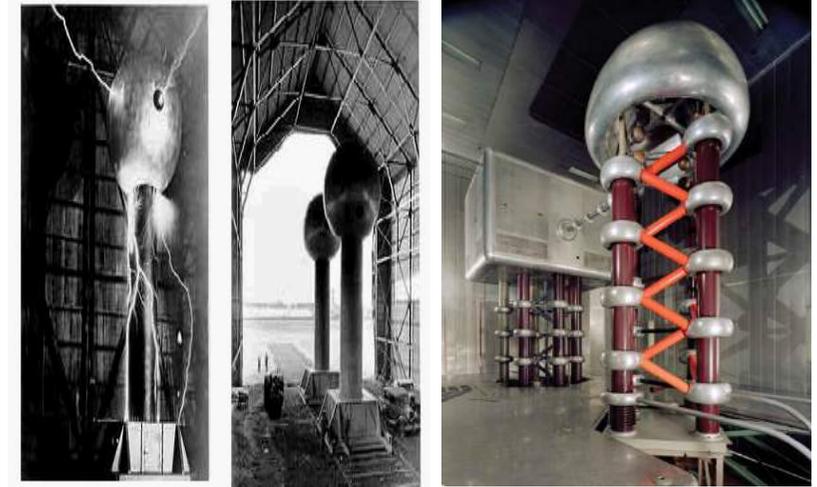
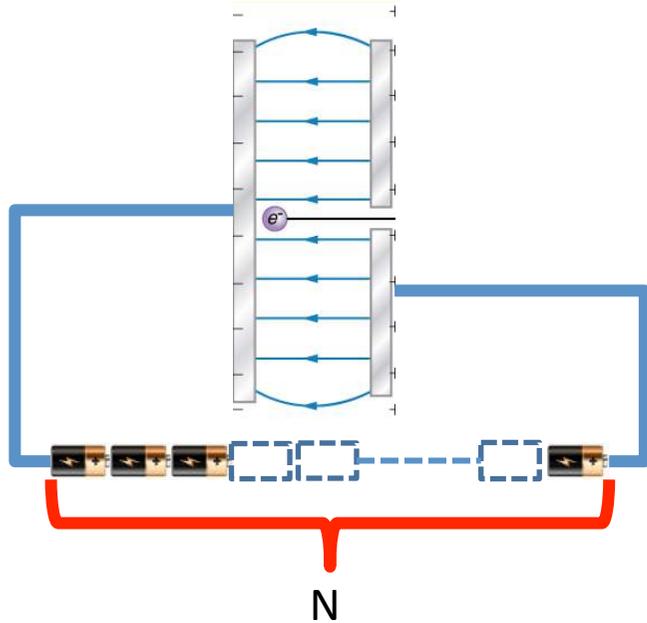
$$\Delta W = v \Delta p \Rightarrow \Delta W = q E_z \Delta z$$

$$m_0^e = 9.109 \cdot 10^{-31} [\text{Kg}] = 0.511 \left[ \frac{\text{MeV}}{c^2} \right]$$

$$m_0^p = 1.673 \cdot 10^{-27} [\text{Kg}] = 938.3 \left[ \frac{\text{MeV}}{c^2} \right]$$

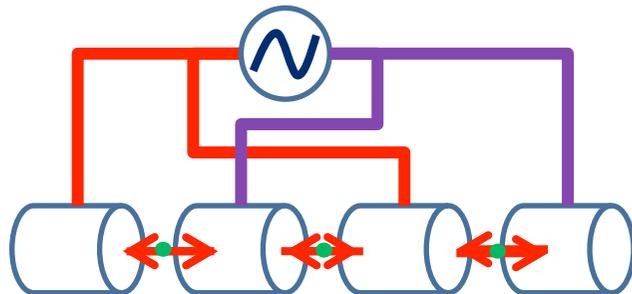
Alle energie tipiche di lavoro degli acceleratori attualmente esistenti i **leptoni** sono particelle **totalmente relativistiche** ( $\gamma \gg 1$ , ad eccezione della primissima fase di accelerazione). Questo non è necessariamente vero per **protoni e ioni** che nella maggior parte delle applicazioni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

# ACCELERAZIONE DI PARTICELLE CON CAMPI ELETTRICI E A RADIOFREQUENZA



$V < 5MV (10^6 V)$

Campi variabili (a radiofrequenza)



Si possono ottenere tensioni equivalenti fino a 100 MV/m

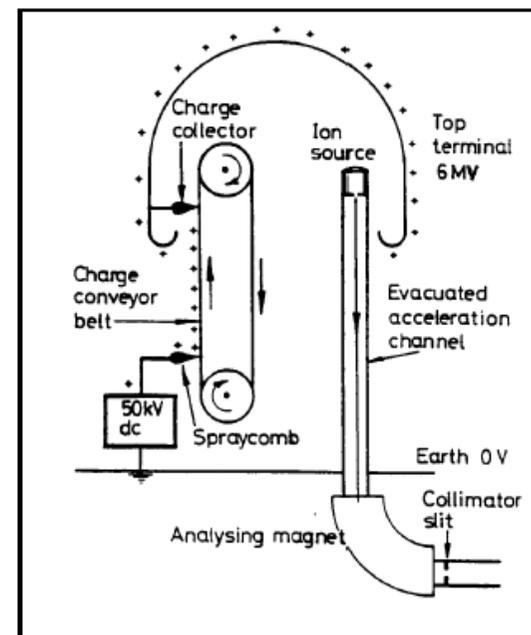
In tali strutture la massima energia è teoricamente limitata soltanto dalla massima lunghezza dell'acceleratore



# 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*

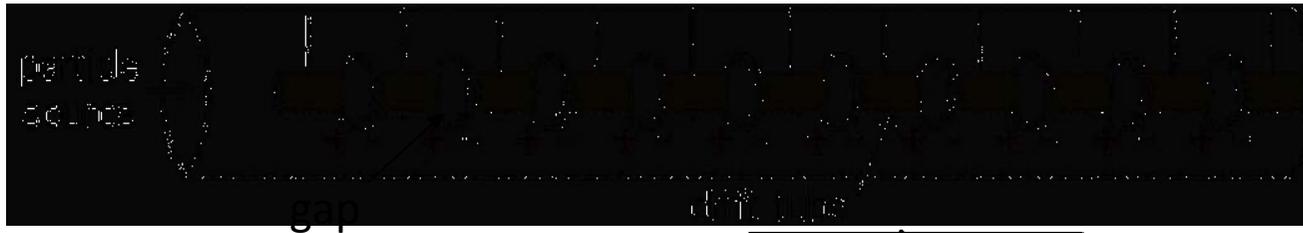


# Moderni Acceleratori Lineari

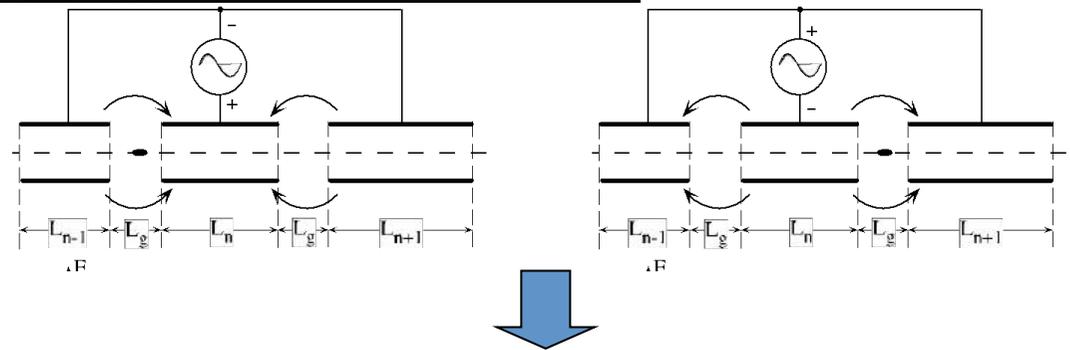
## PRINCIPIO:

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).



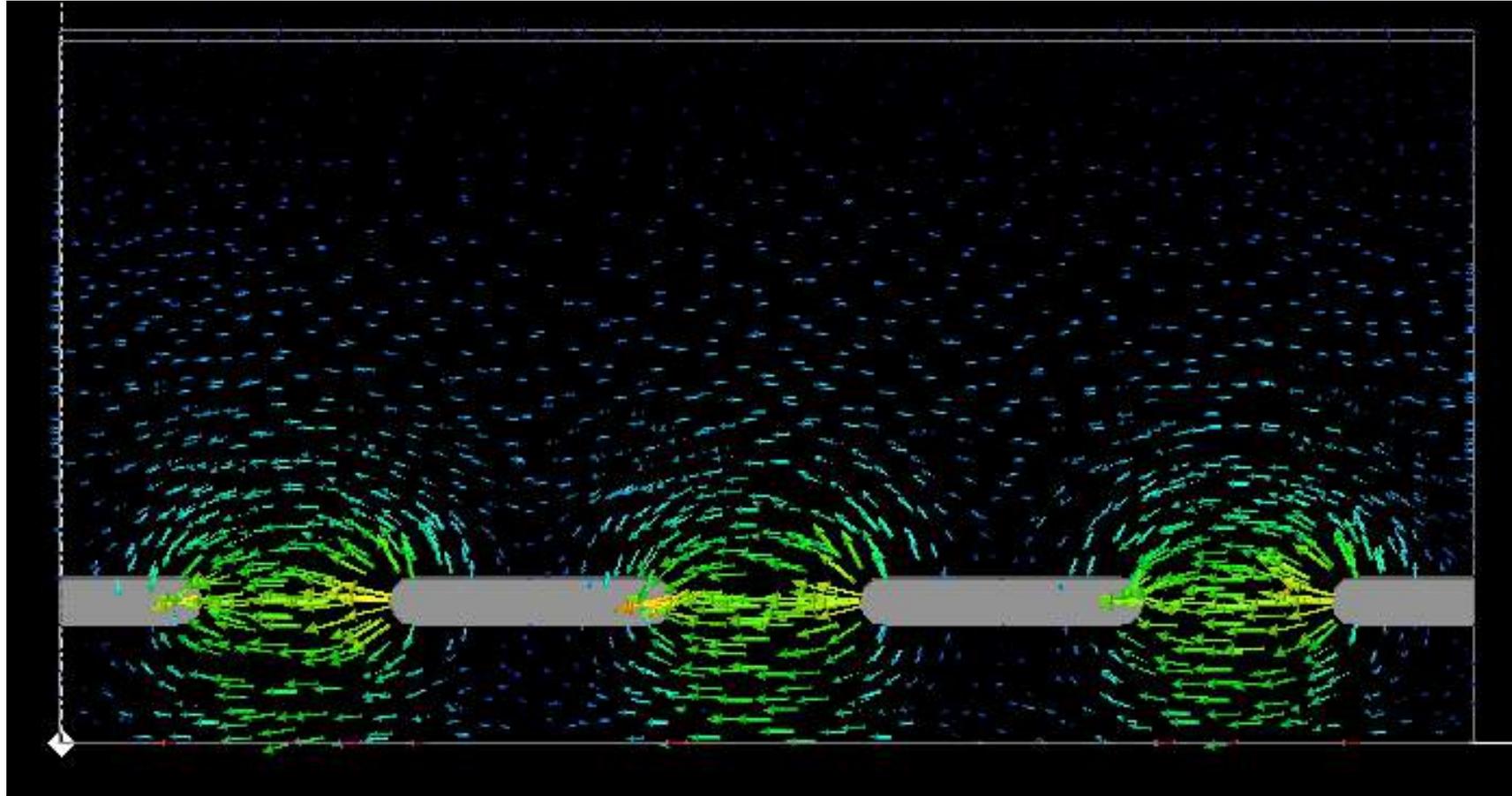
Se la lunghezza dei tubi cresce con la velocità delle particelle in modo tale che il **tempo di attraversamento** di ciascun tubo sia sempre uguale a **mezzo periodo** del generatore di tensione, è possibile sincronizzare la tensione accelerante col moto delle particelle ed ottenere un guadagno di energia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



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

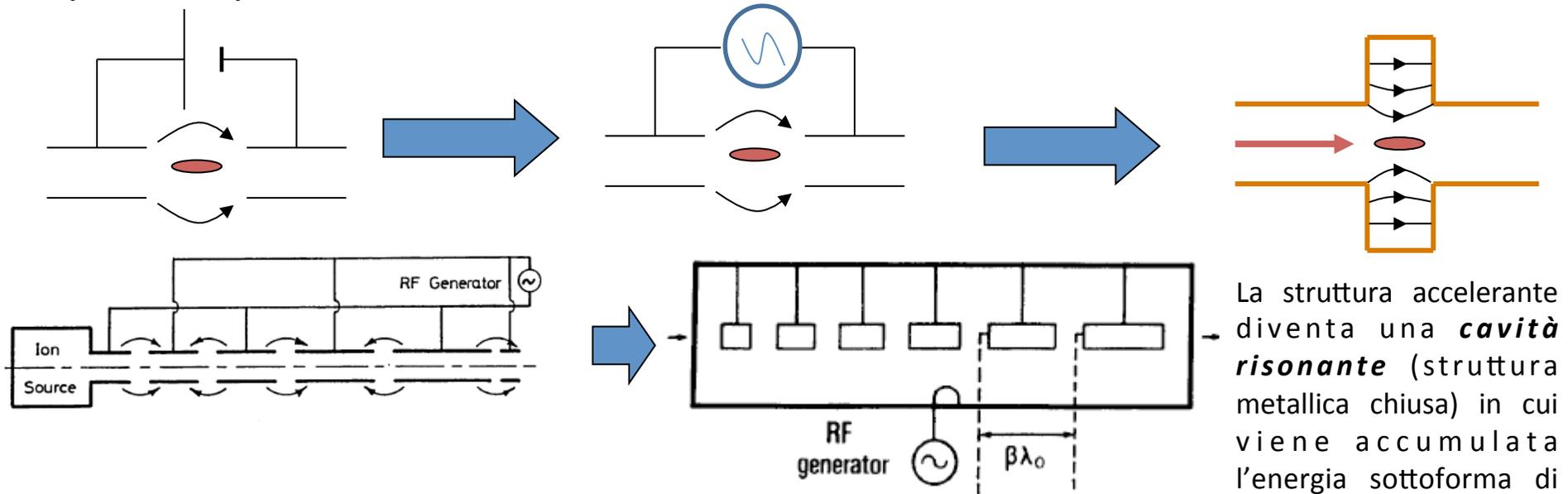
La condizione  $L_n \ll \lambda_{RF}$  (senza la quale non possiamo considerare i tubi superfici equipotenziali) implica  $\beta \ll 1$ . La tecnica di Wideröe *non è utilizzabile* per particelle *relativistiche*.

# DTL: video

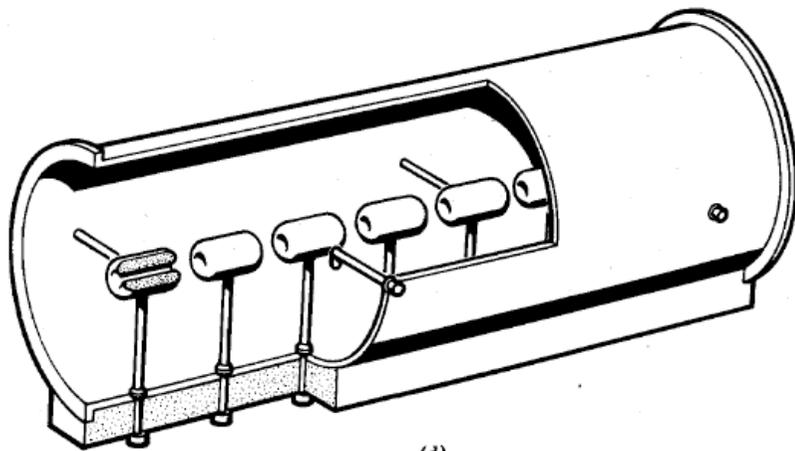


# Accelerazione con campi elettrici a radiofrequenza

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**.



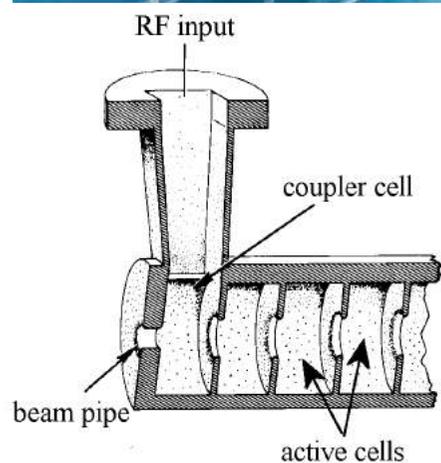
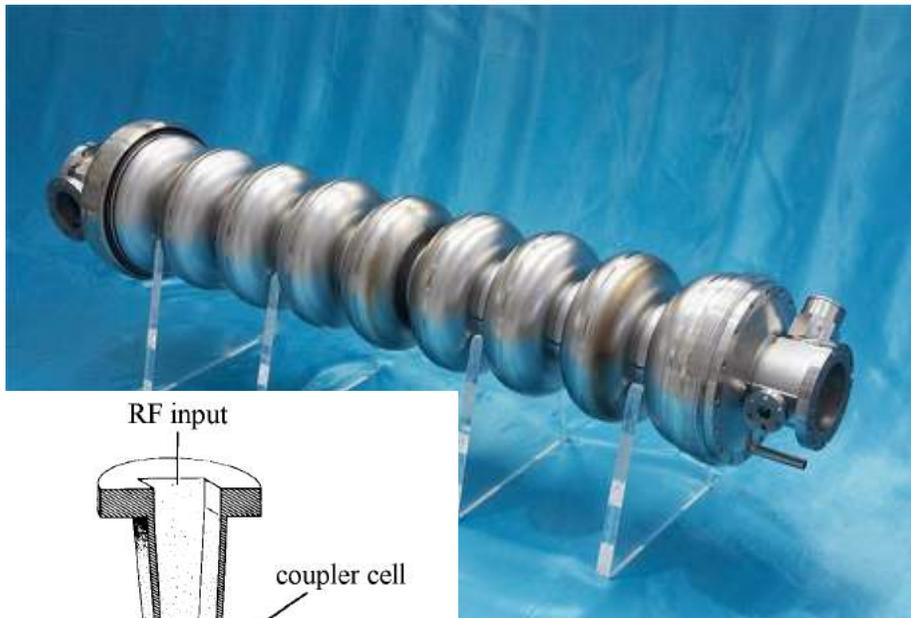
La struttura accelerante diventa una **cavità risonante** (struttura metallica chiusa) in cui viene accumulata l'energia sotto forma di campi elettromagnetici a RF



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

# 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).



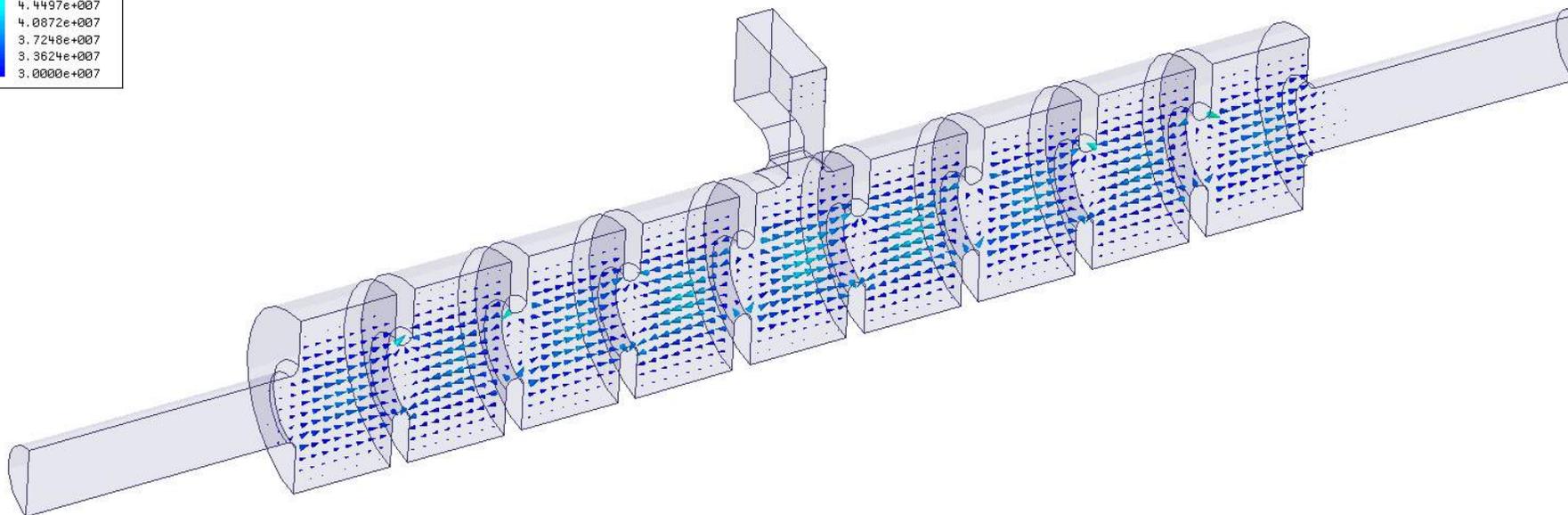
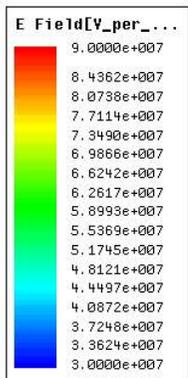
Esistono sia cavità che operano a **temperatura ambiente** (tipicamente in rame) che **cavità superconduttive** che operano a qualche K.

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

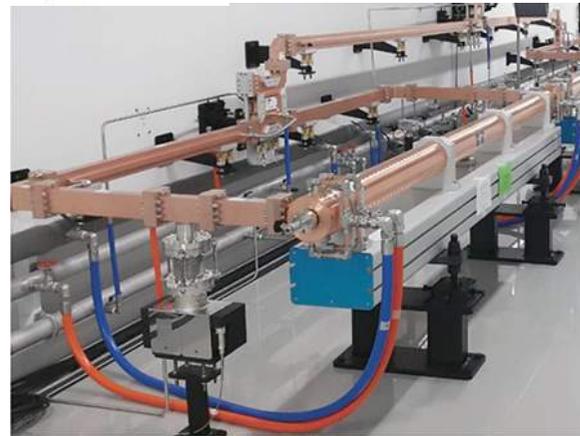
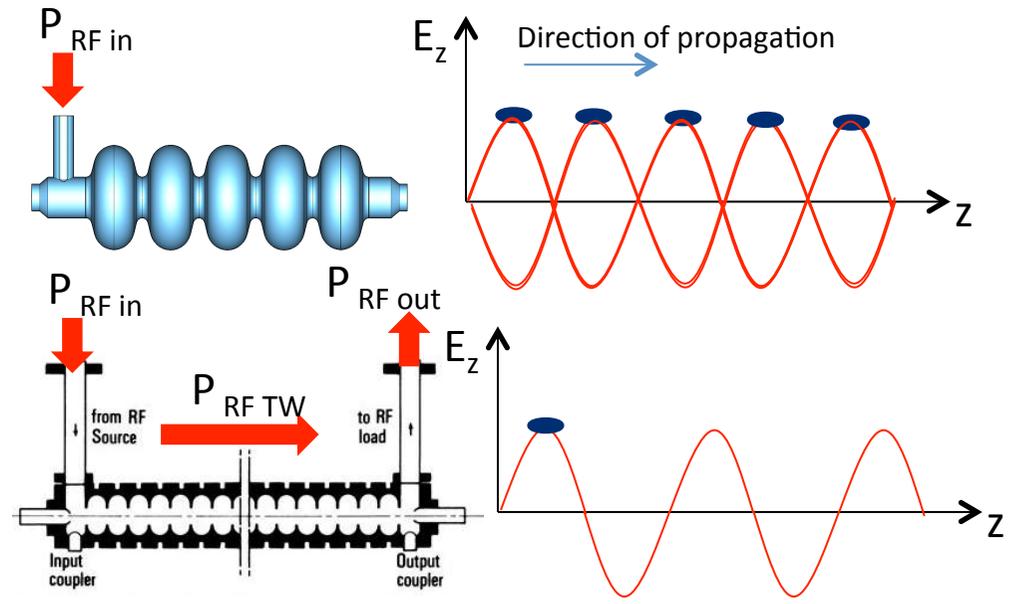
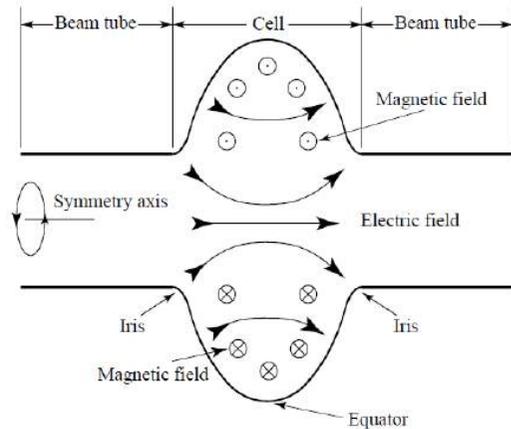
# Cavità a Radiofrequenza: video



0 35 70 (mm)

# ACCELERAZIONE DI PARTICELLE CON CAMPI E.M.

Per l'accelerazione di particelle si utilizzano **cavità metalliche a radiofrequenza** in cui un campo elettromagnetico sincrono con il passaggio delle particelle ha una componente lungo la direzione di propagazione del fascio.



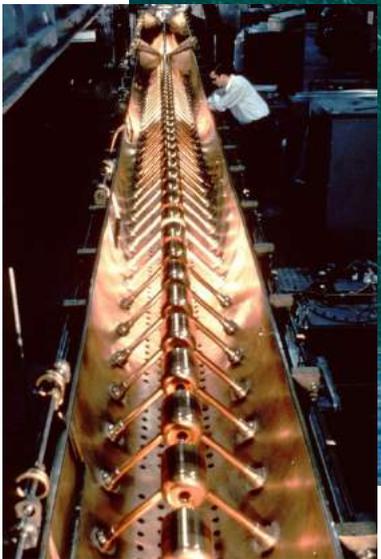
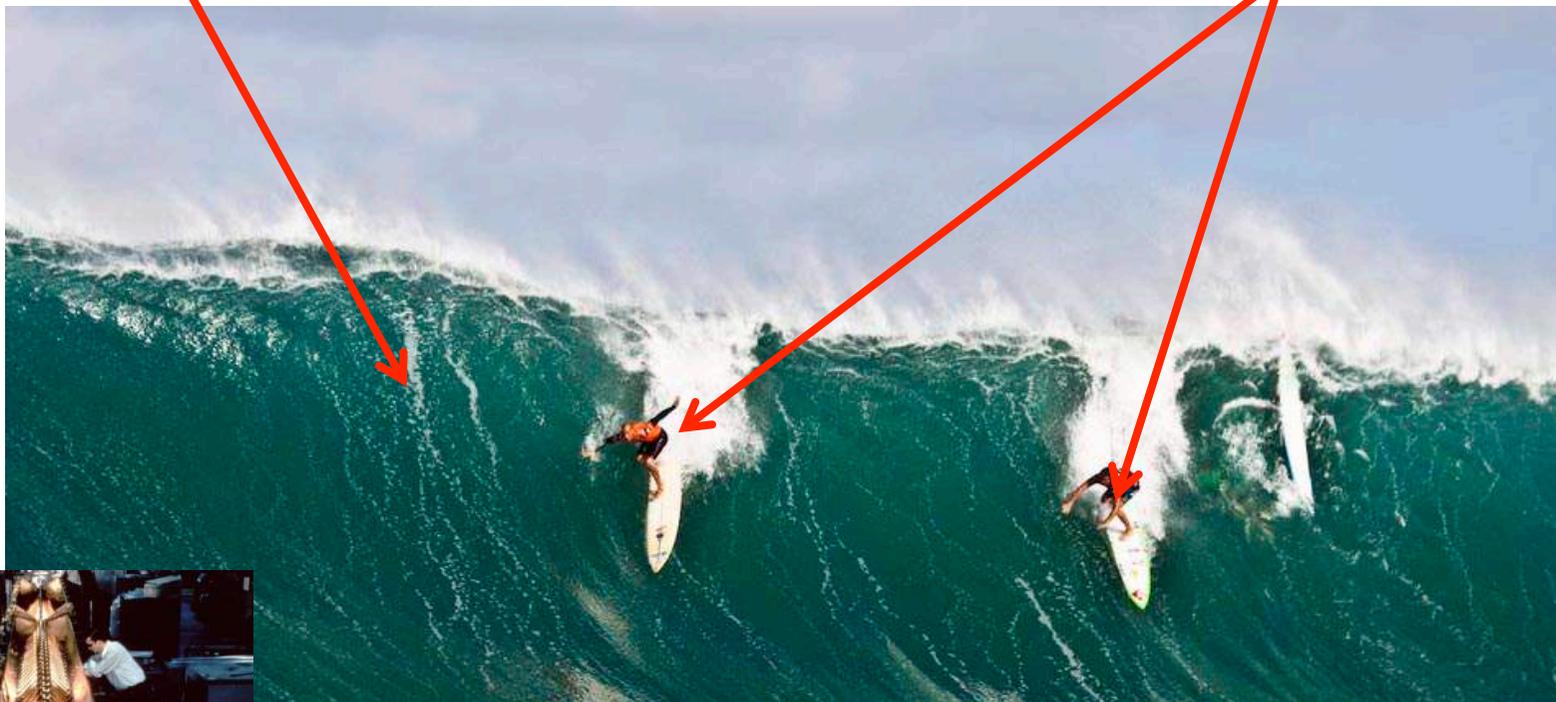
**Gradienti acceleranti per linac ad elettroni** attualmente in funzione sono dell'ordine di **20-40 MV/m**.

Per protoni a bassa energia tali valori scendono di almeno un fattore 10.

# PARTICELLE ACCELERATE

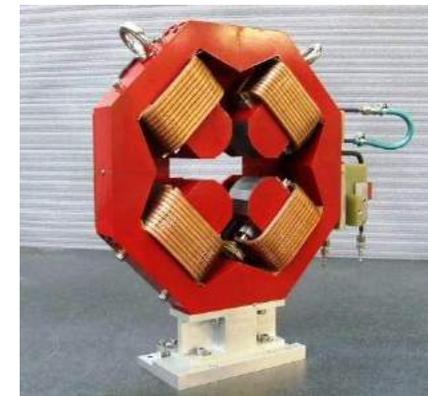
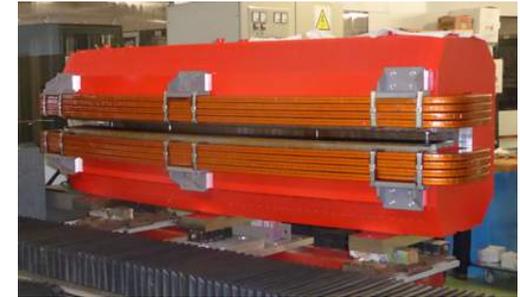
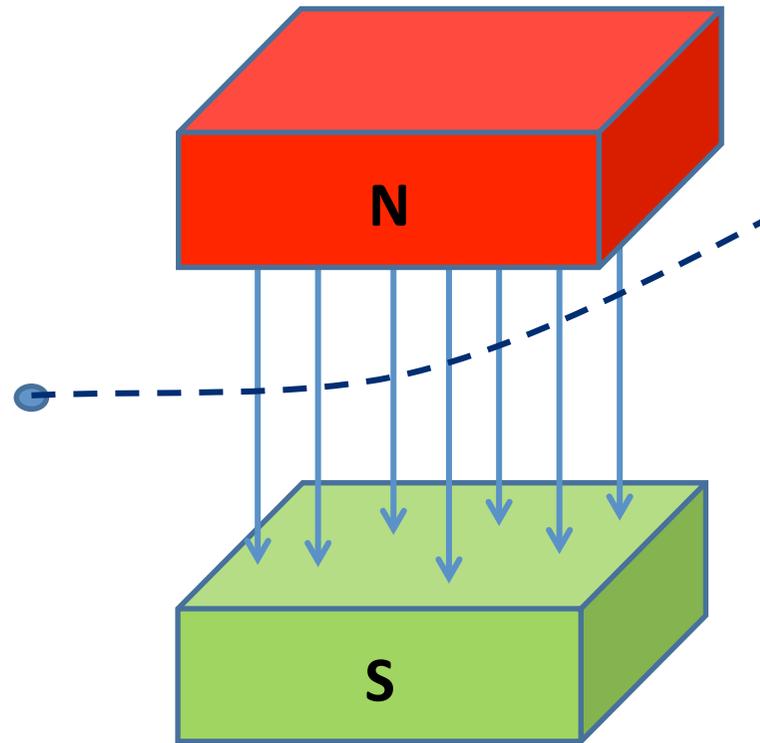
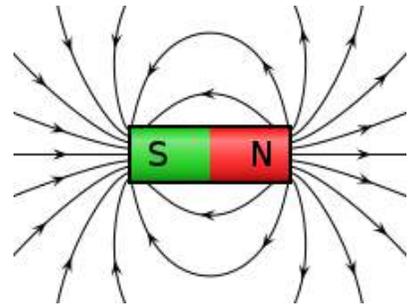
Campo Elettrico

Particelle accelerate



# COME SI CURVANO LE PARTICELLE: CAMPI MAGNETICI

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



QUADRUPOLO

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

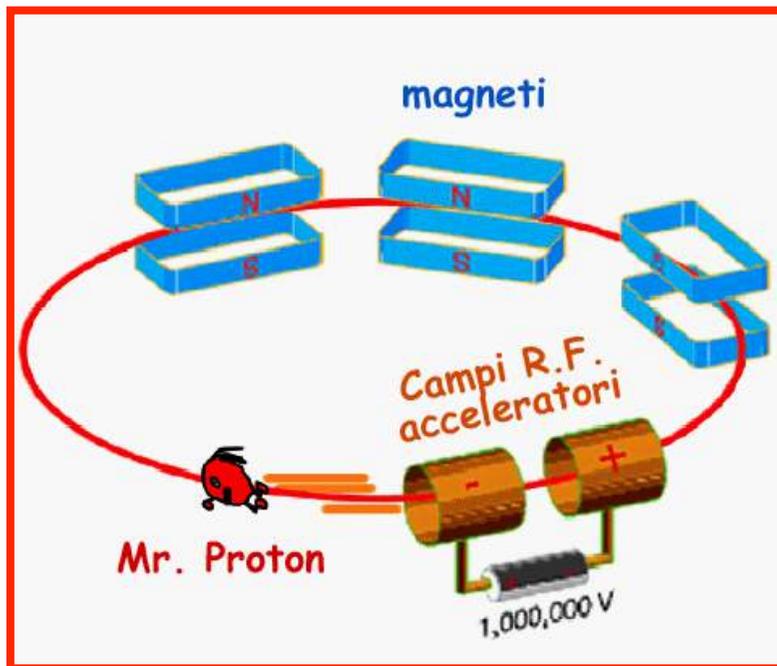
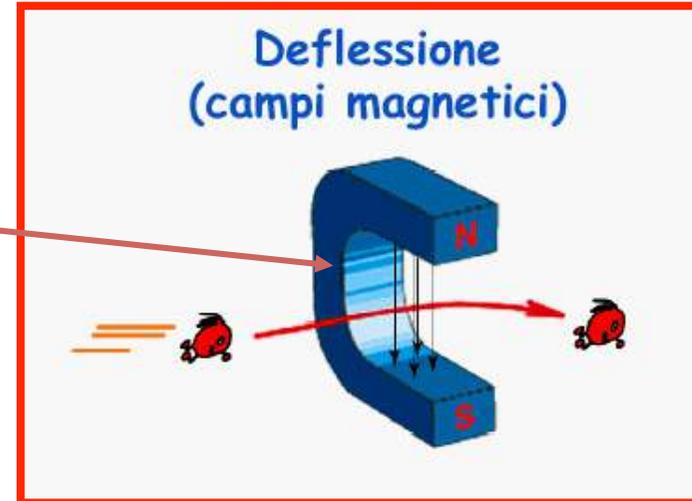
**Magneti dipolari** sono utilizzati per curvare le particelle  
**Magneti quadrupolari** per focalizzarle

# 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

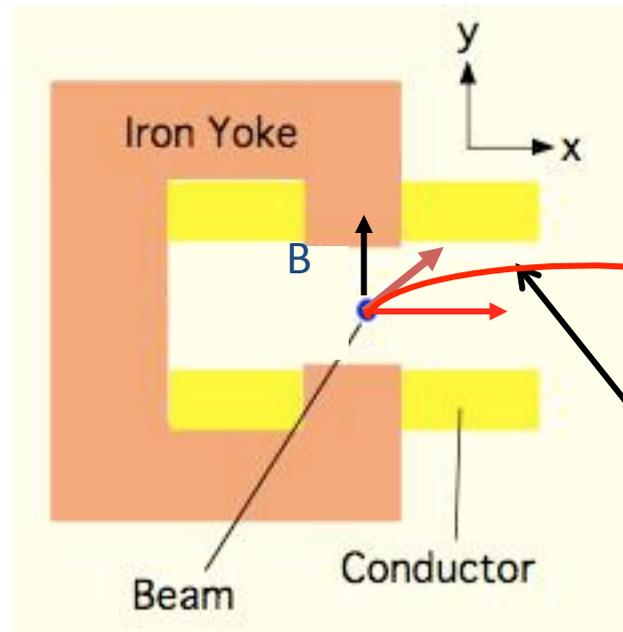
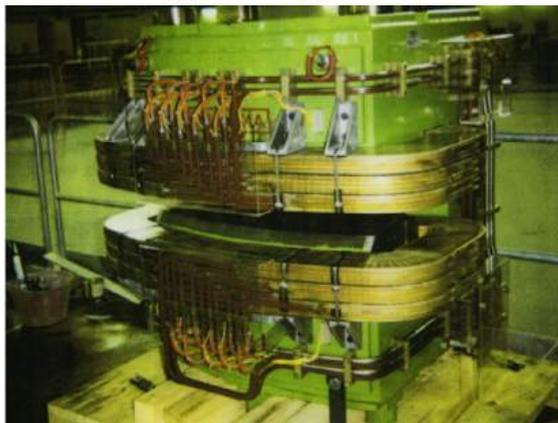
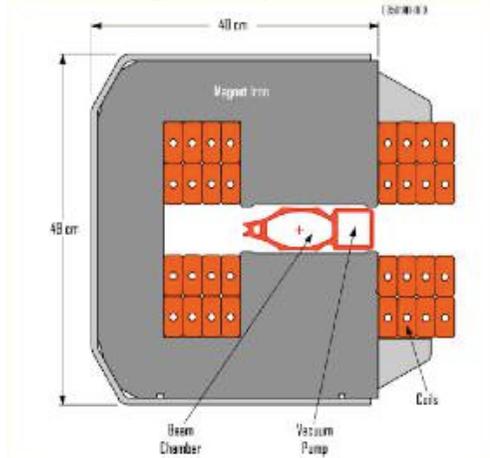


Particelle che viaggiano in un **acceleratore lineare** attraversano **una sola volta** la struttura accelerante mentre in un acceleratore **circolare** attraversano **più volte** la stessa cavità.

**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  $B\rho$

$$B\rho[Tm] = \frac{p}{q} \cong \frac{W}{cq}$$

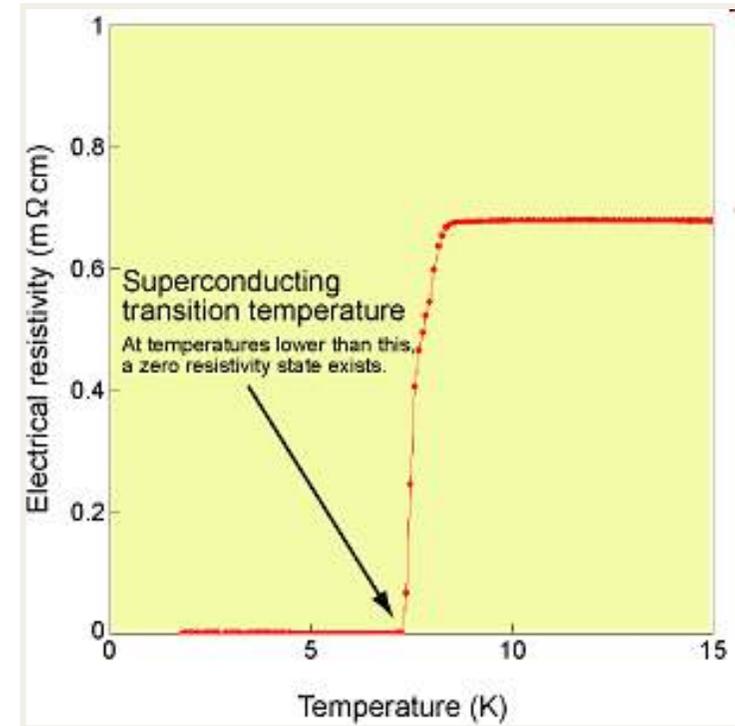
I dipoli elettromagnetici vengono usati per produrre B non oltre 1-2 T.  
Per campi magnetici più intensi si ricorre a **magneti superconduttori**

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

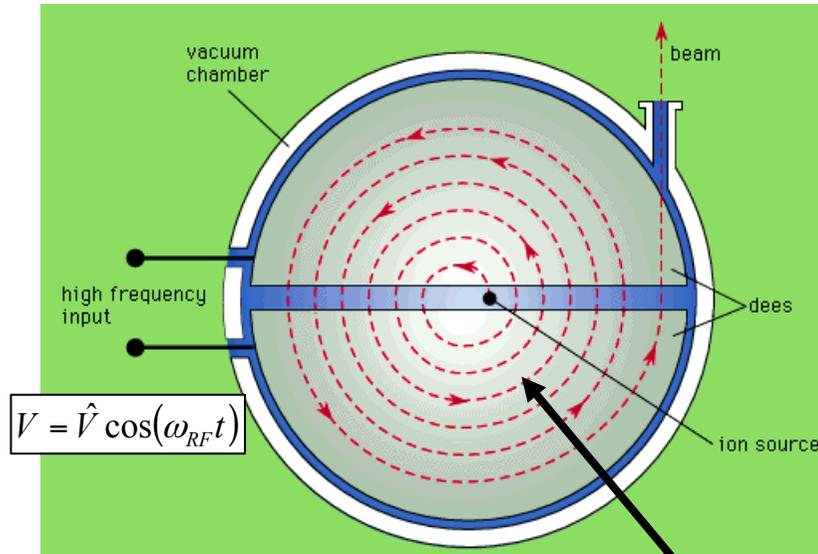


Basse temperature: 2 Kelvin = -271° C

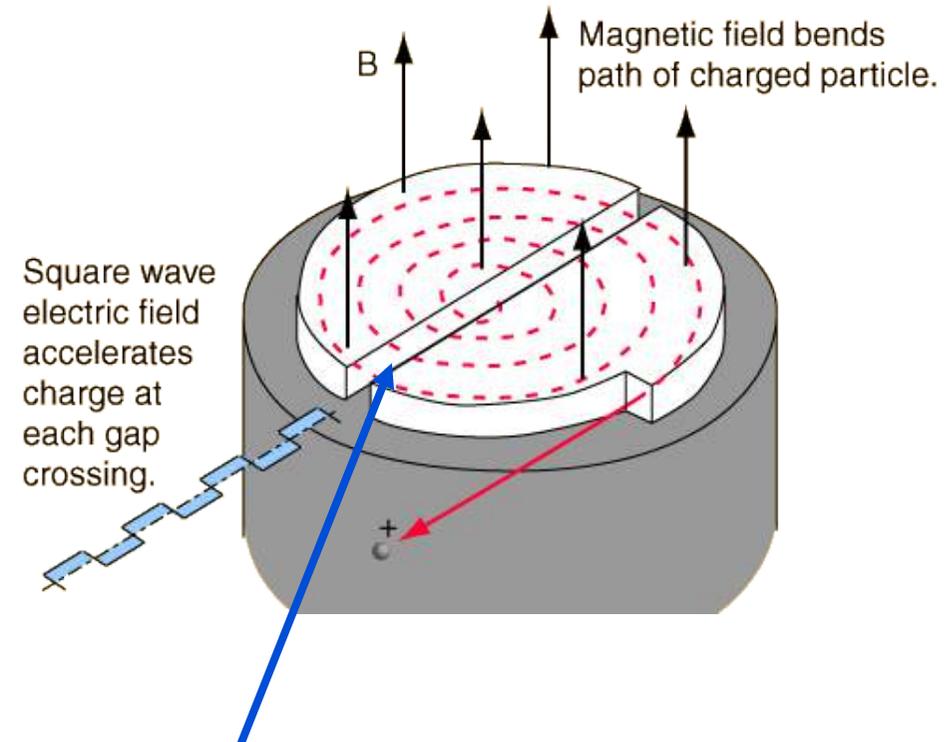
Tali temperature sono ottenute raffreddando i conduttori con un dispositivo frigorifero che usa **He superfluido: il criostato**

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

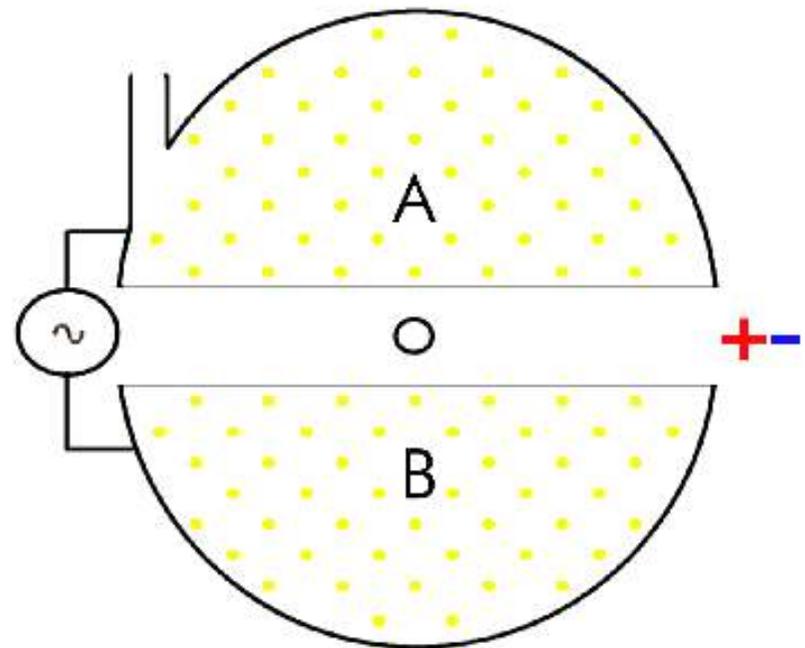
# Ciclotroni (2/2)



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**.

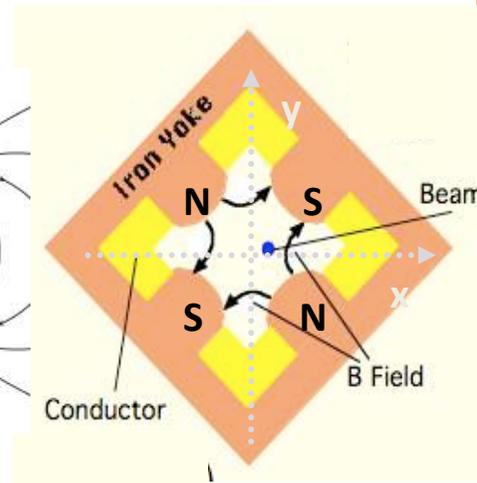
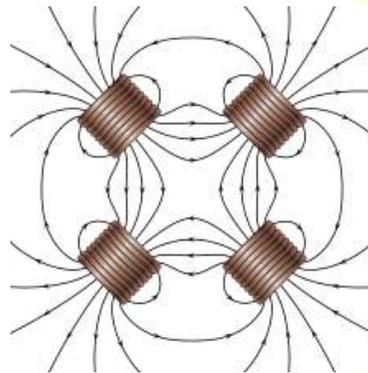
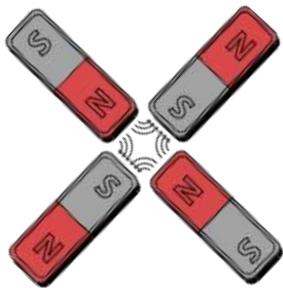


# Quadrupolo: focheggiamento

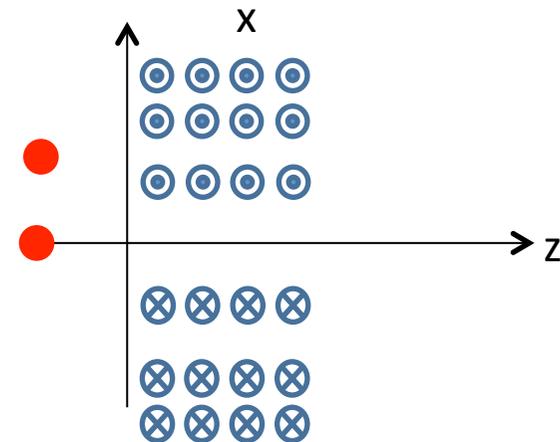
E' un magnete con **4 poli** che focheggia le traiettorie delle singole **particelle** così come fa una lente con la luce.

Caratteristiche di B

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



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

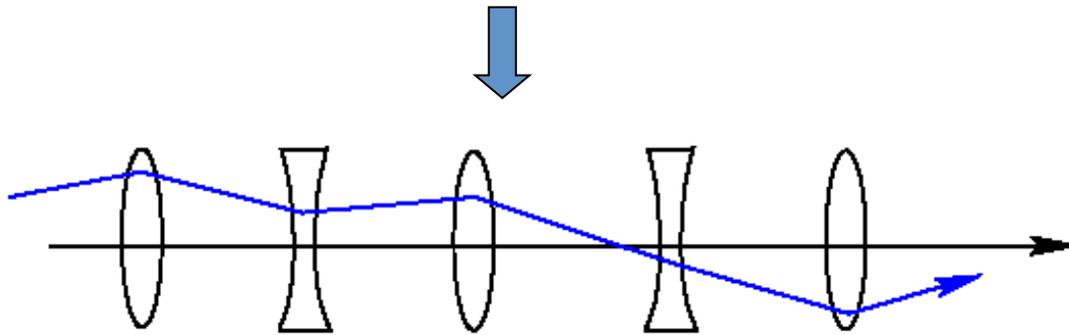


# Foccheggiamento trasverso: funzione $\beta$

Un *quadrupolo* foceggia il fascio in un piano e lo defoceggia nell'altro.

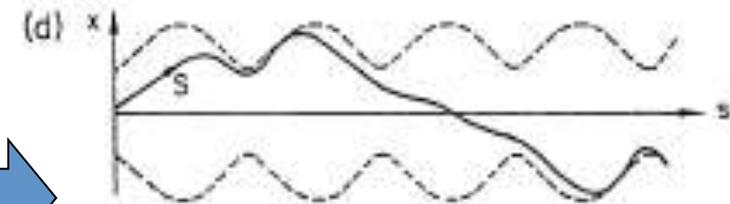
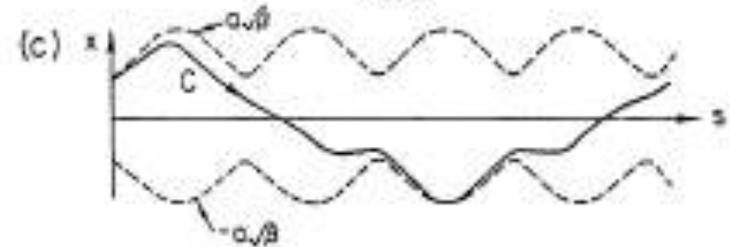
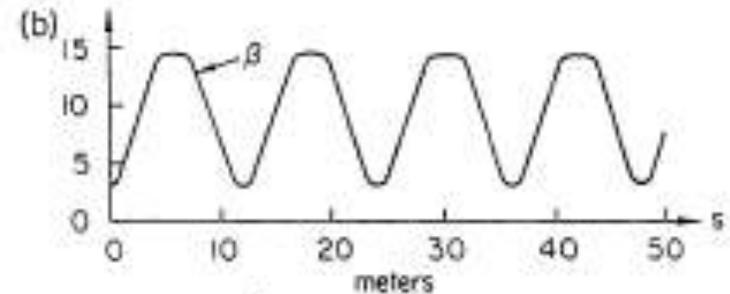
Per ottenere il *foccheggiamento complessivo* di un fascio di particelle lungo un canale di trasporto o in un acceleratore circolare bisogna usare una *sequenza di quadrupoli con il segno alternato*

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.



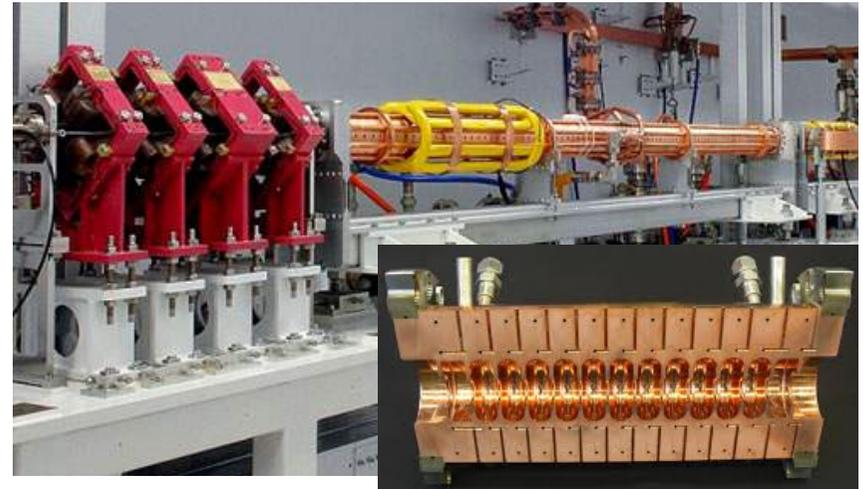
Il **VUOTO** in un acceleratore di particelle è tipicamente dell'ordine di  $10^{-8}$ - $10^{-10}$  mbar.

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



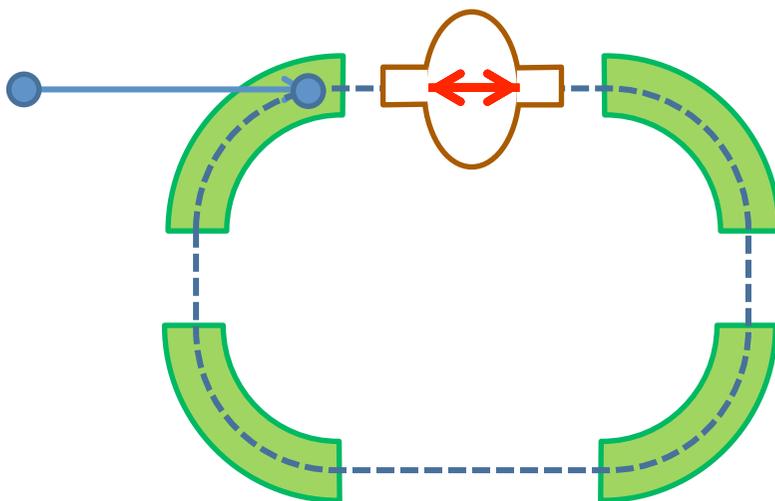
# ACCELERATORI LINEARI E SINCROTRONI

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



I LINAC possono essere di piccole (**qualche metro**) o grandi dimensioni (**km**) e di tipologie diverse a seconda del tipo di particelle da accelerare. Possono essere di metallo a temperatura ambiente (rame) o superconduttori.

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

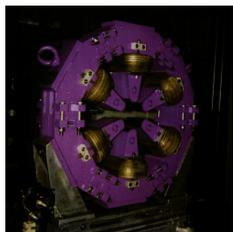


# Acceleratori circolari: il Sincrotrone

Il *sincrotrone* è un acceleratore di particelle circolare.

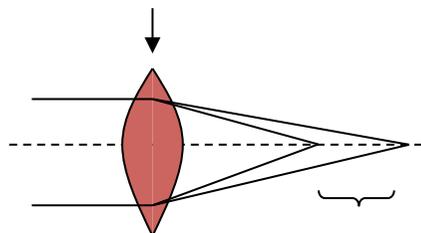
A differenza del LINAC, nel sincrotrone, *le particelle descrivono orbite chiuse* grazie all'utilizzo di magneti curvati (**dipoli**) che deflettono le particelle. Il **campo elettrico è sincronizzato con il fascio** delle particelle in modo che ad ogni passaggio successivo in cavità queste aumentano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

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



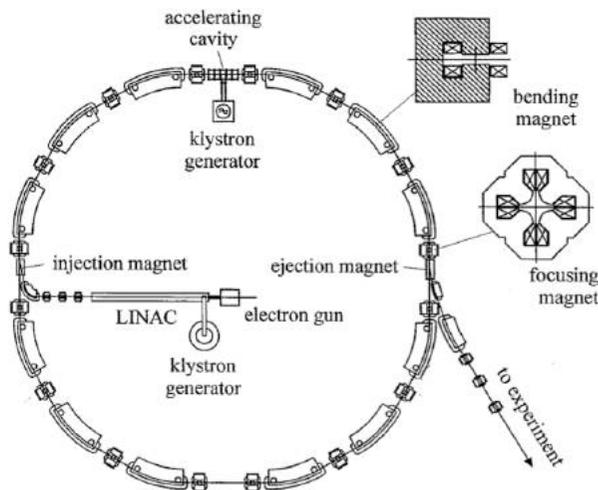
I sestupoli correggono l'effetto cromatico dei quadrupoli

## QUADRUPOLO



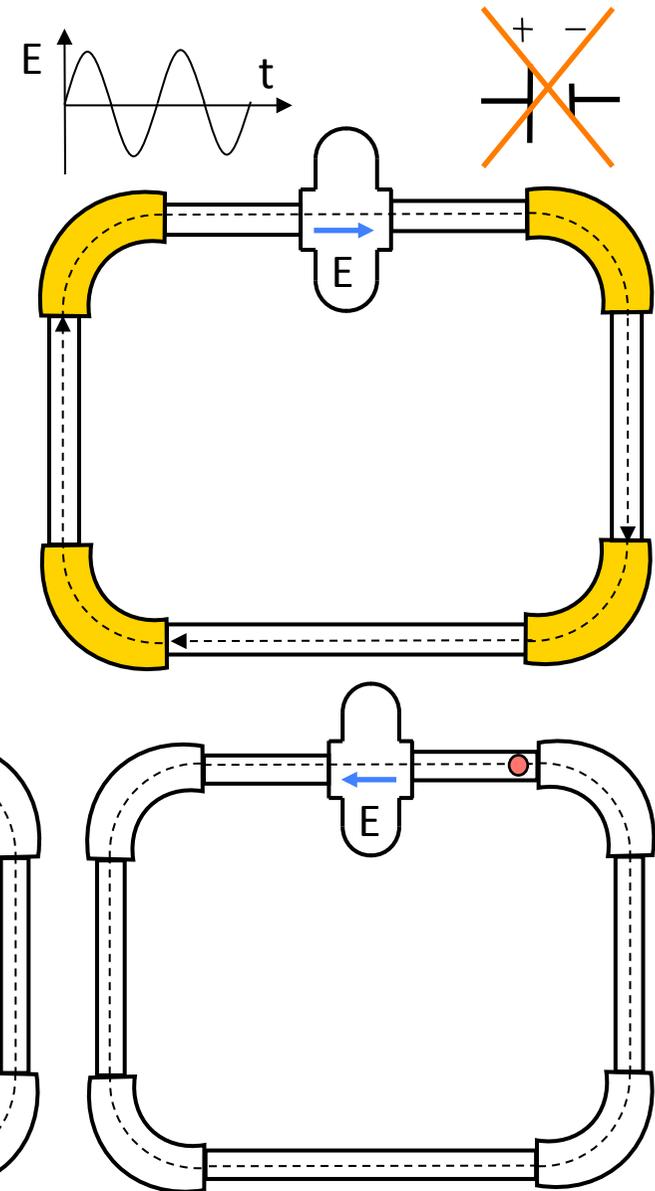
Particelle con diversa energia vengono focalizzate in modo diverso: aberrazione cromatica

**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**

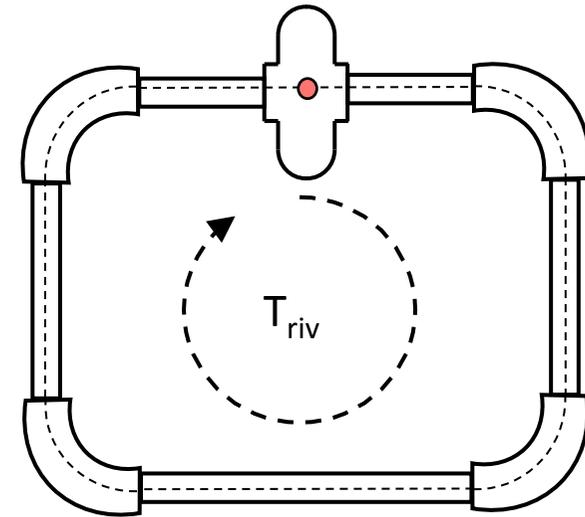
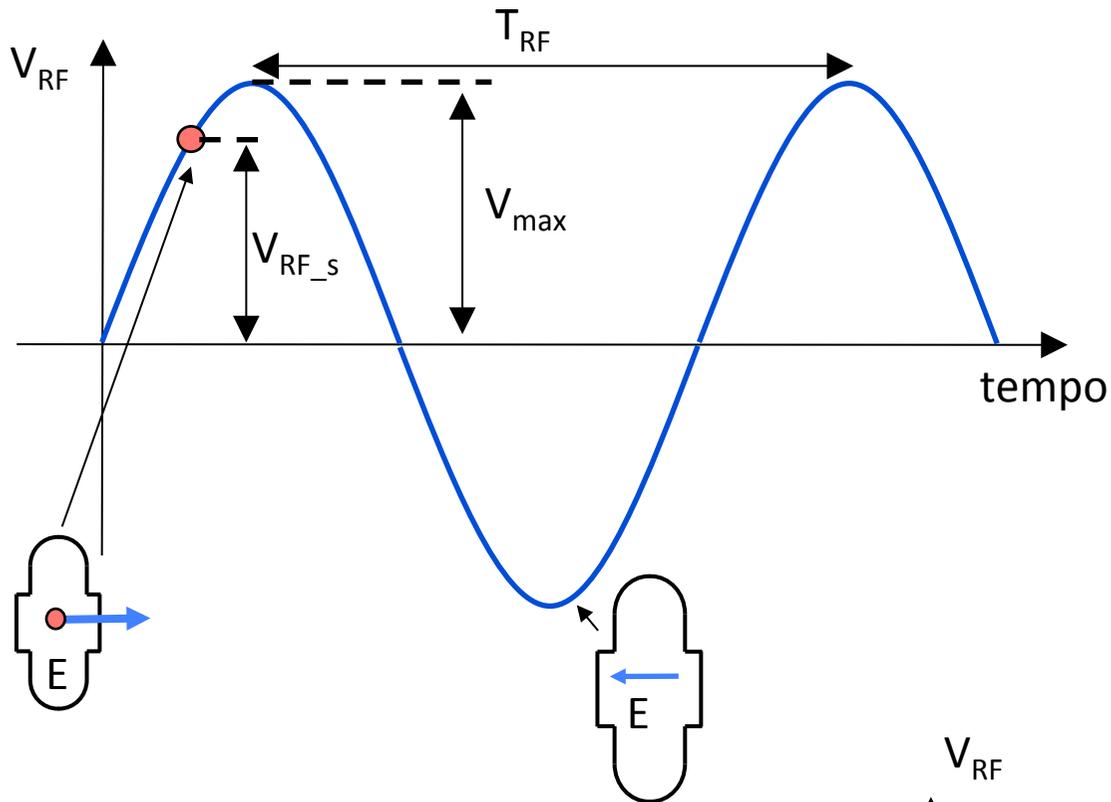


# Accelerazione in un sincrotrone

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).



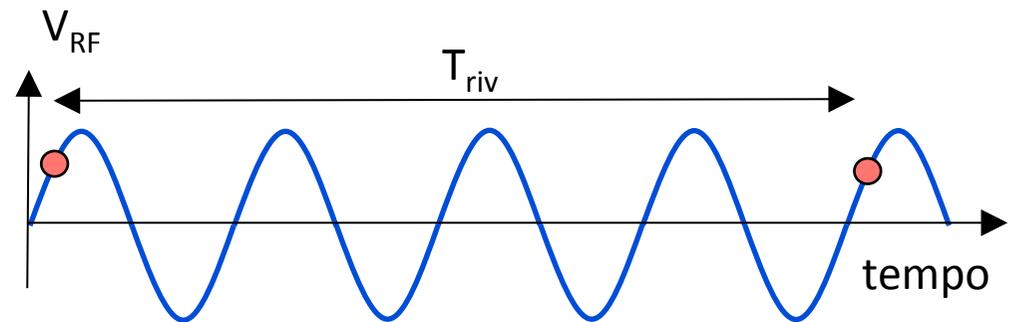
# Periodo di rivoluzione e numero armonico



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

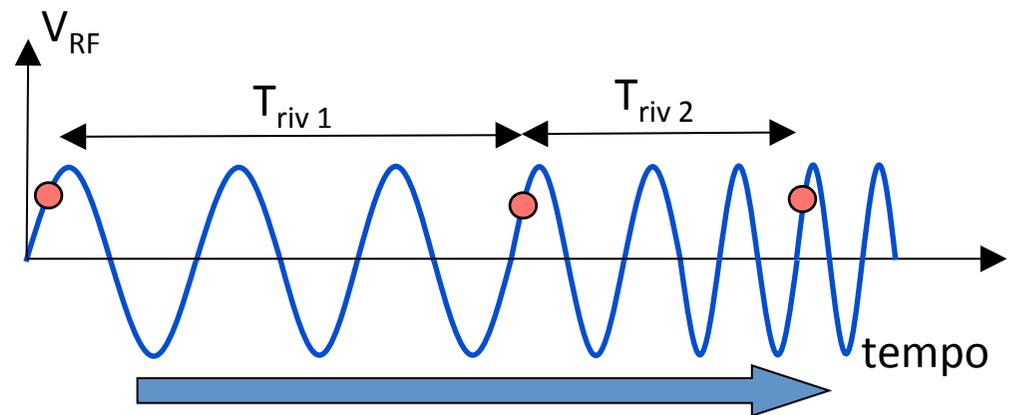
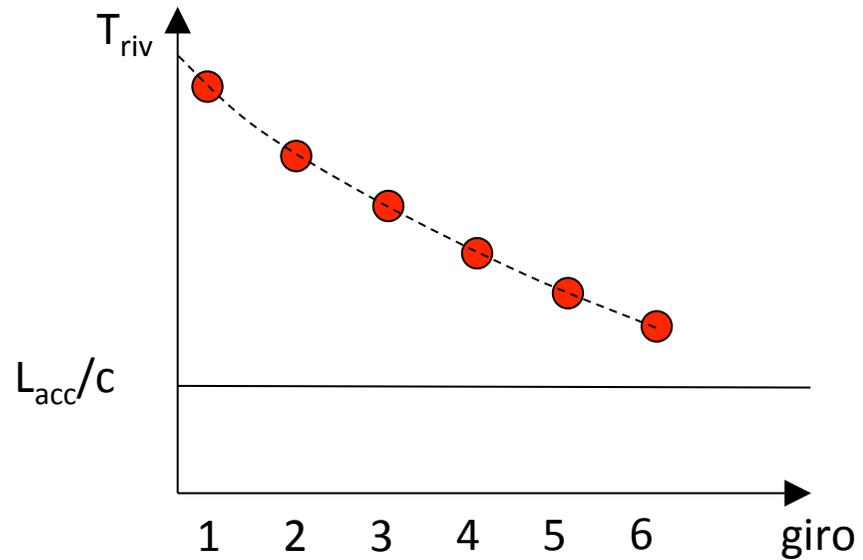
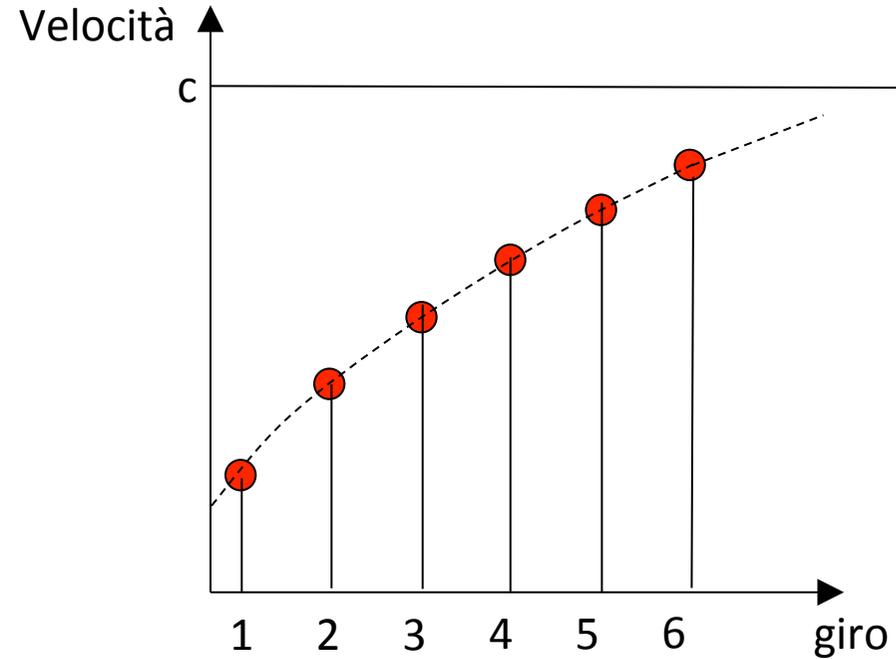
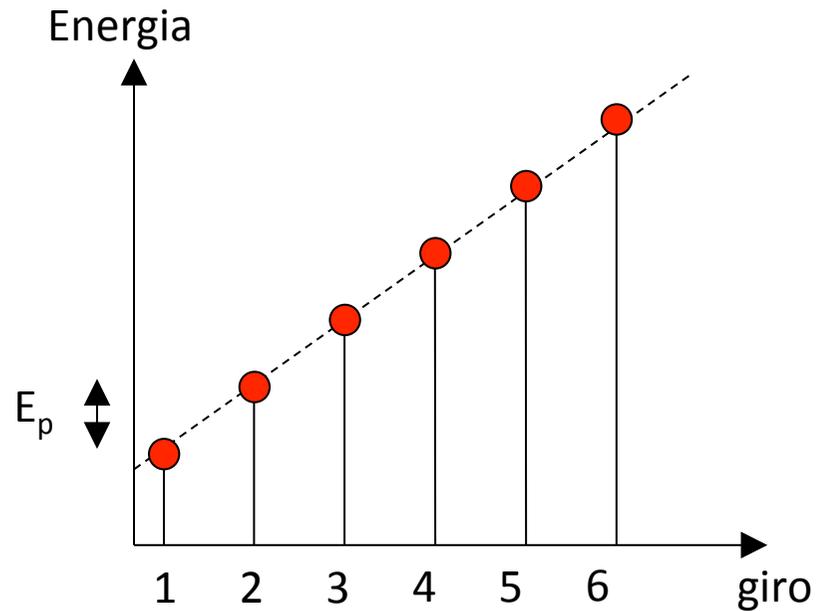
Per avere accelerazione "stabile" ovvero per fare in modo che la particella dopo un giro veda sempre la stessa tensione accelerante in cavità, il periodo di rivoluzione ( $T_{riv}$ ) deve essere un multiplo intero ( $h$ ) del periodo di radiofrequenza ( $T_{RF}$ ) ad ogni giro.

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



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

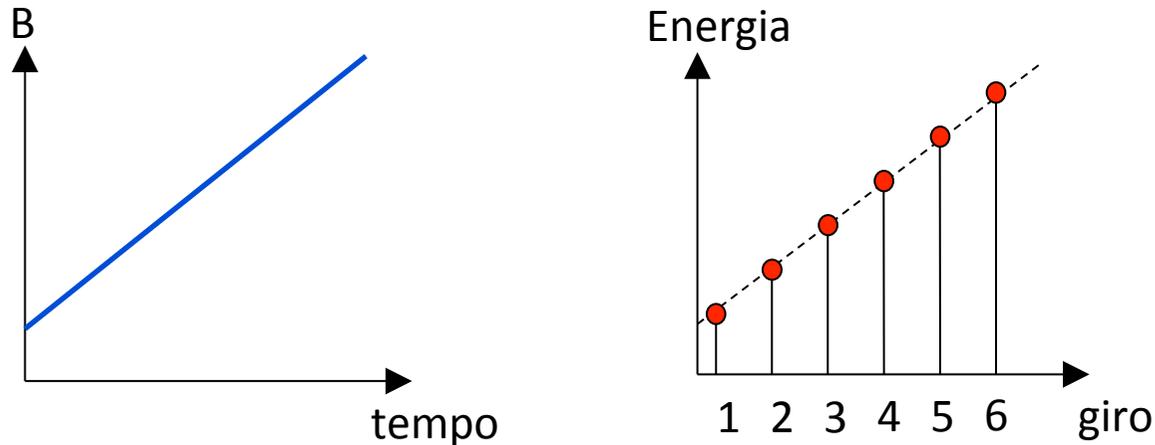
# Accelerazione-energia-velocità



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.



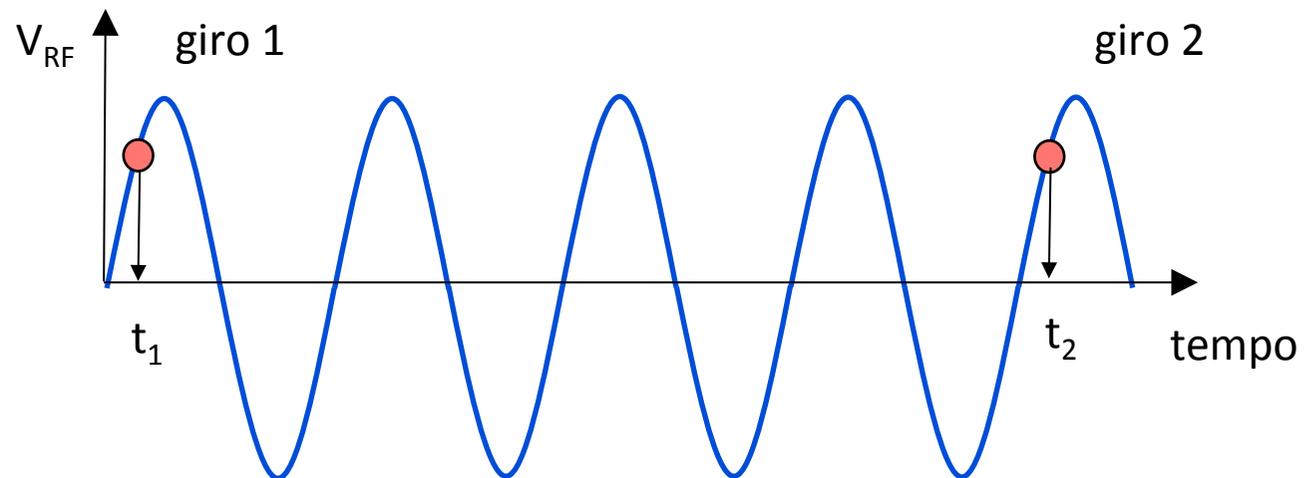
$$R \propto \frac{E_{particella}}{B}$$

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.



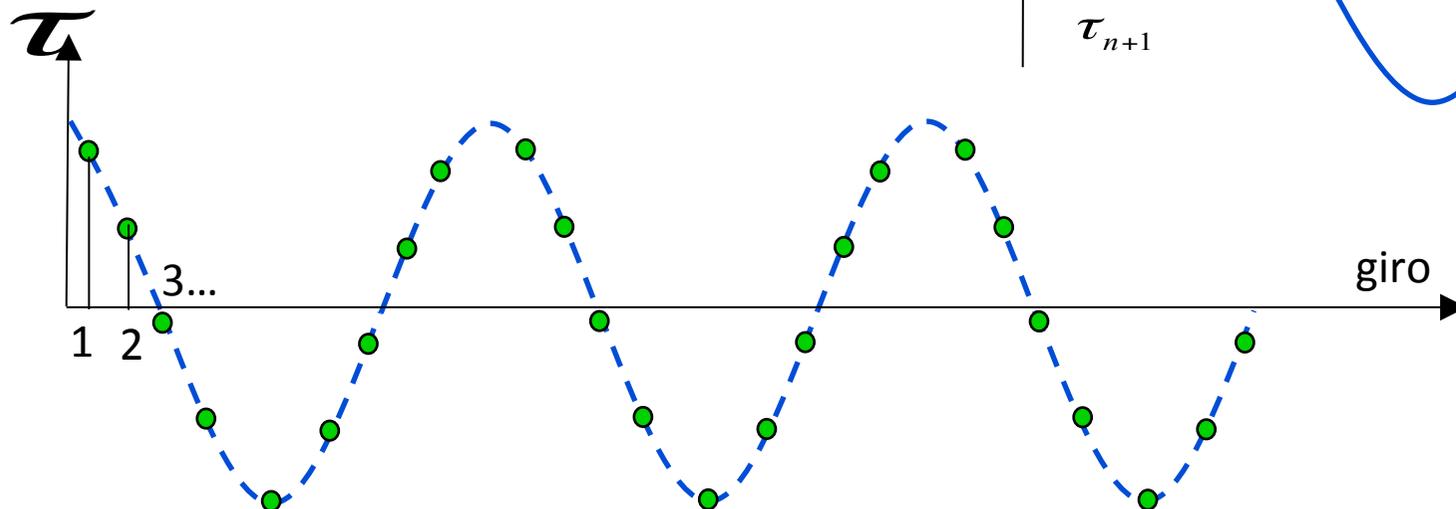
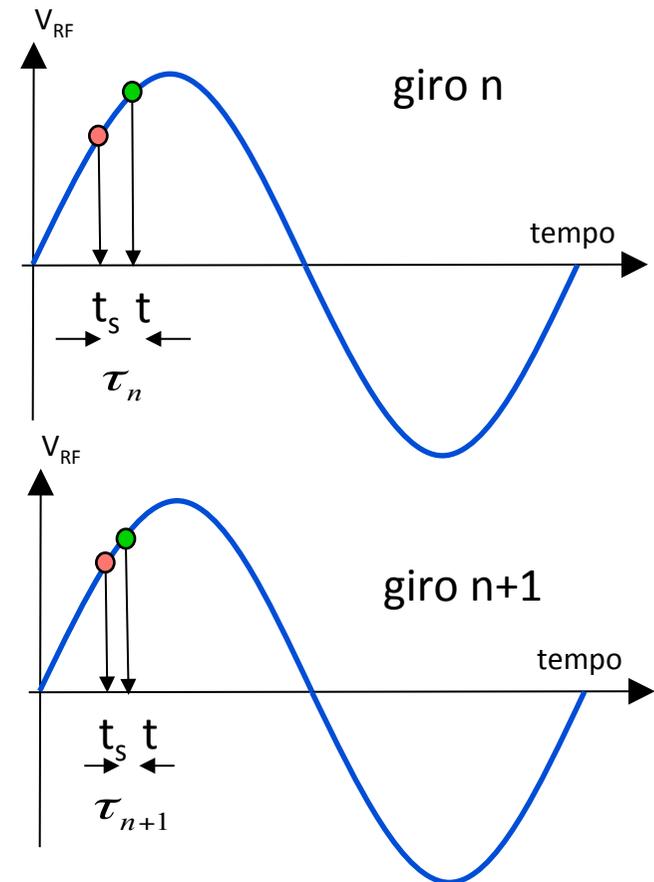
# PARTICELLE NON SINCRONE

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

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

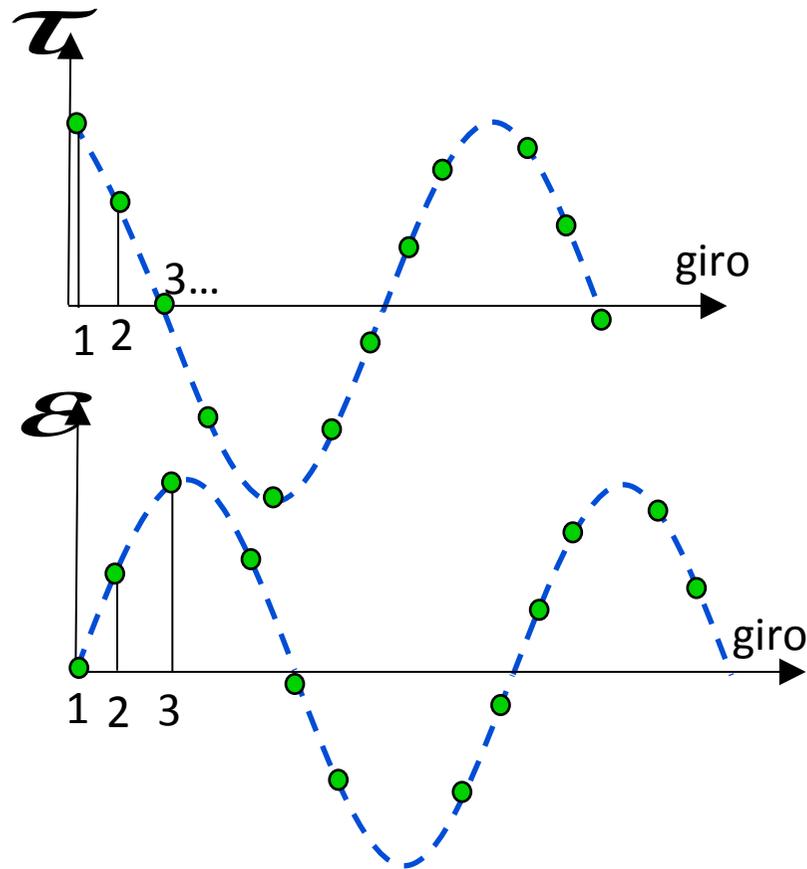
A questa maggiore accelerazione corrisponde un aumento di velocità e, quindi, al giro successivo la particella NON sincrona avrà **recuperato parte del suo "svantaggio"** rispetto a quella sincrona e si troverà più vicina. Viceversa se una particella arriva prima della particella sincrona in cavità vede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

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



# Oscillazioni di sincrotrone

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

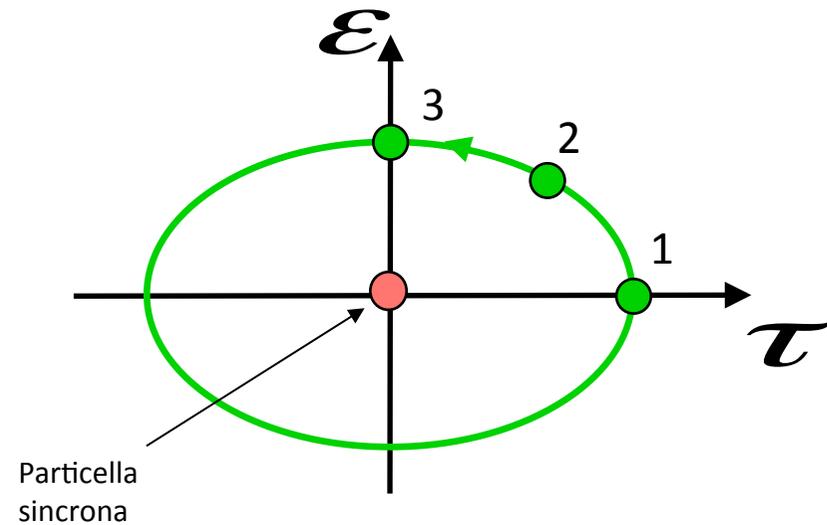


Tempo di arrivo in  
cavità della  
particella NON  
sincrona al giro n

Tempo di arrivo in  
cavità della particella  
sincrona al giro n

Differenza tra i  
due tempi di  
arrivo al giro n

$$t - t_s = \tau$$



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

Energia della  
particella NON  
sincrona al giro n

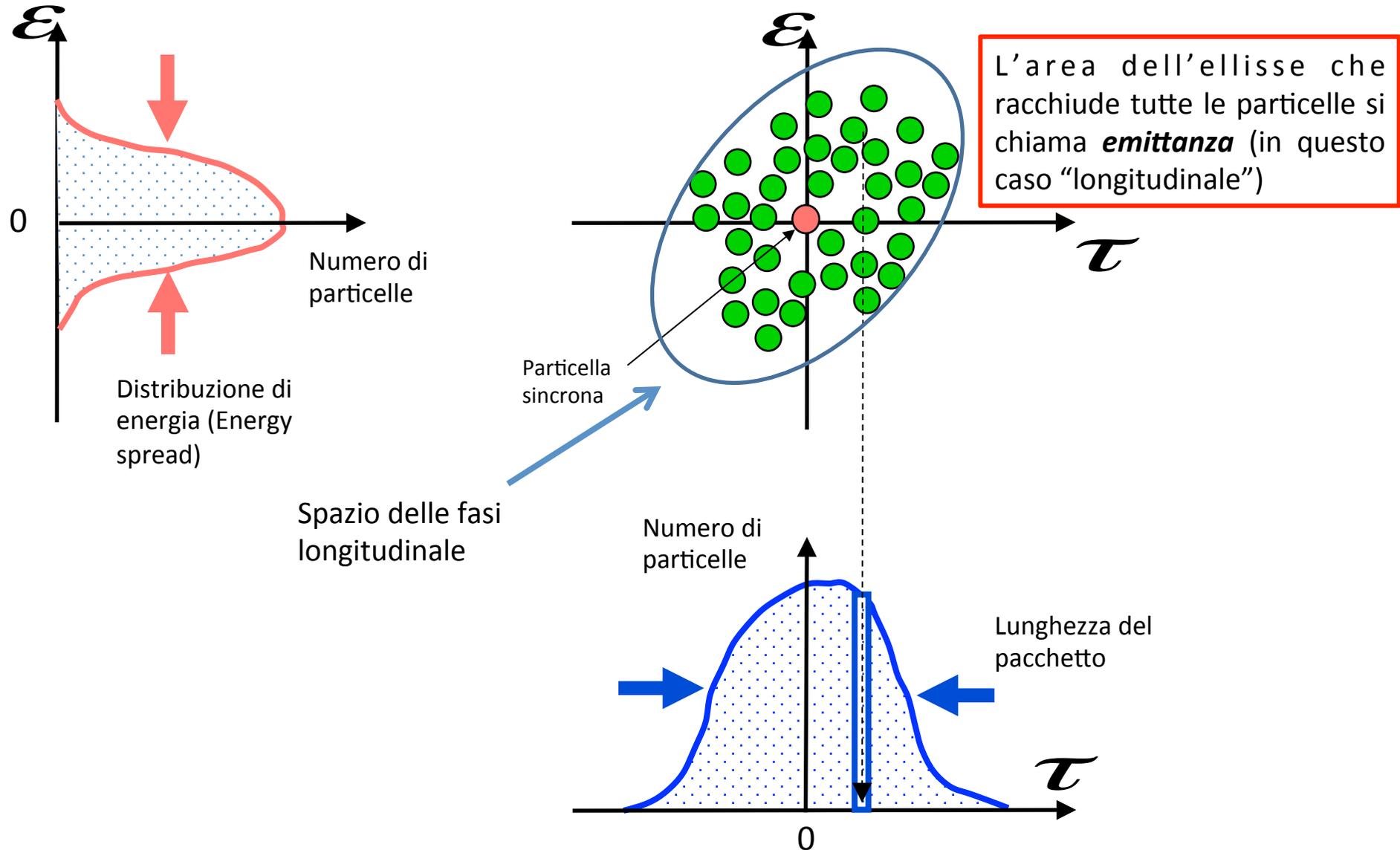
Energia della  
particella sincrona  
al giro n

Differenza tra le  
due energie al  
giro n

$$E - E_s = \varepsilon$$

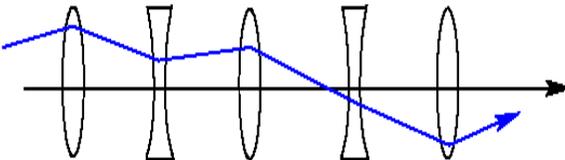
# Lunghezza del pacchetto di particelle e distribuzione di energia

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:

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


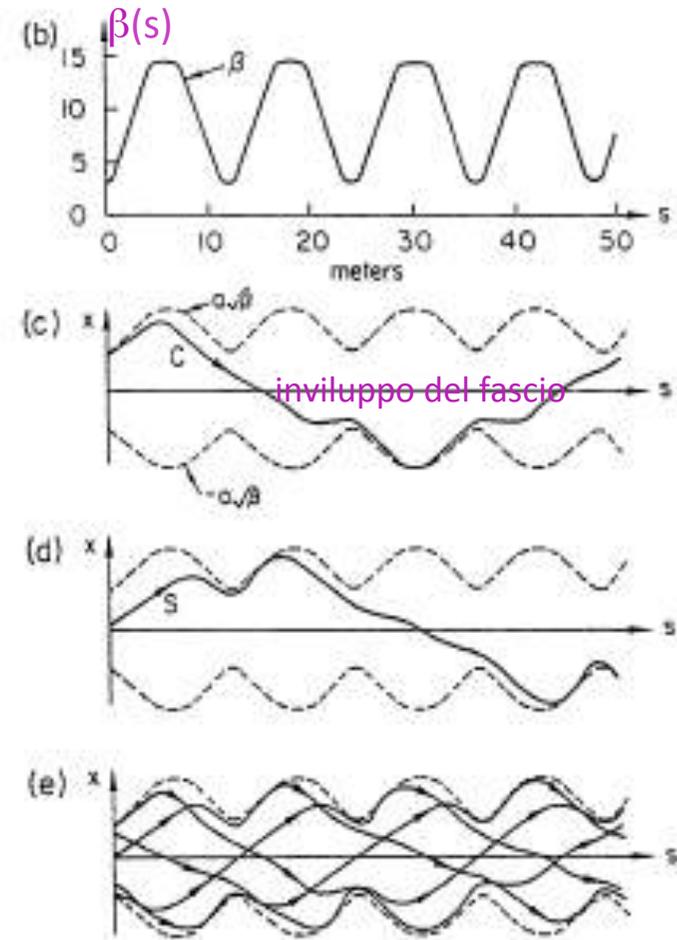
Coordinata curvilinea lungo la macchina

## Le oscillazioni di betatrone:

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

La **funzione  $\beta$**  è:

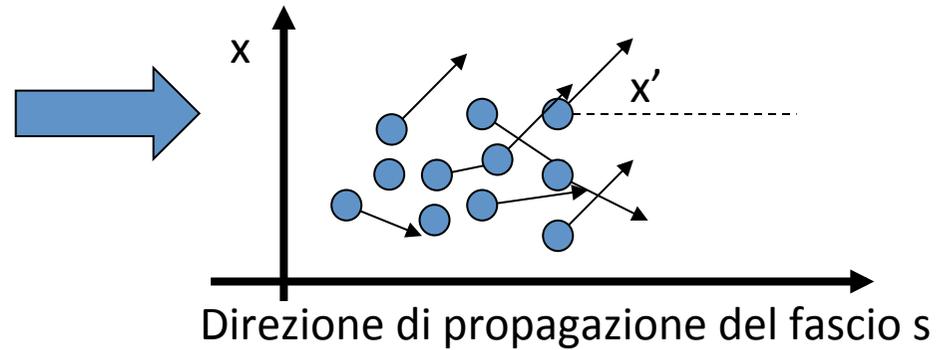
- sempre positiva
- misurata in metri
- periodica in  $s$  ossia riassume gli stessi valori ad ogni giro
- ha un massimo nei QF un minimo nei QD
- descrive globalmente l'effetto dei campi magnetici nell'anello



Tutte le traiettorie stabili sono comprese entro l'involuppo

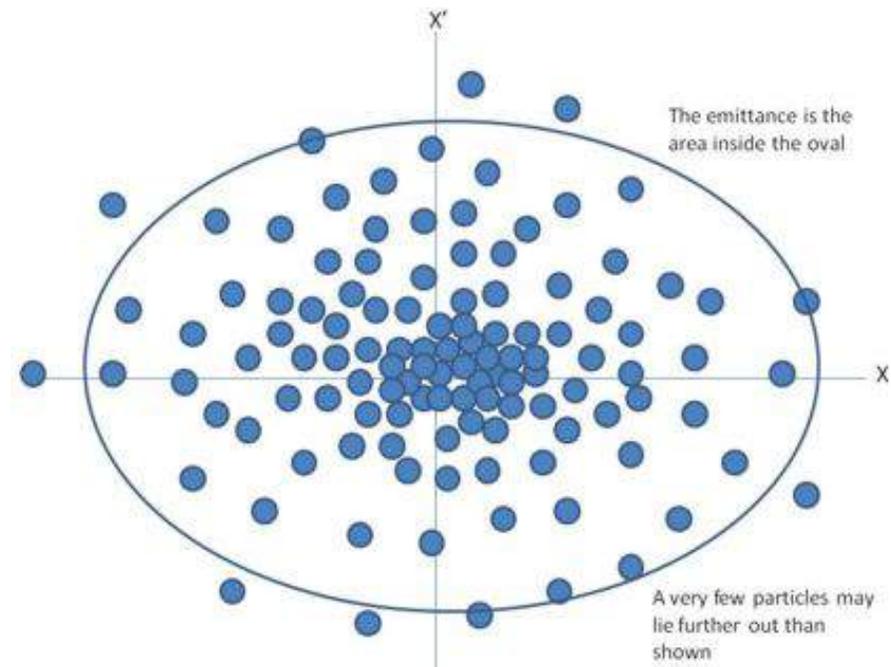
# Spazio delle fasi ed emittanza

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

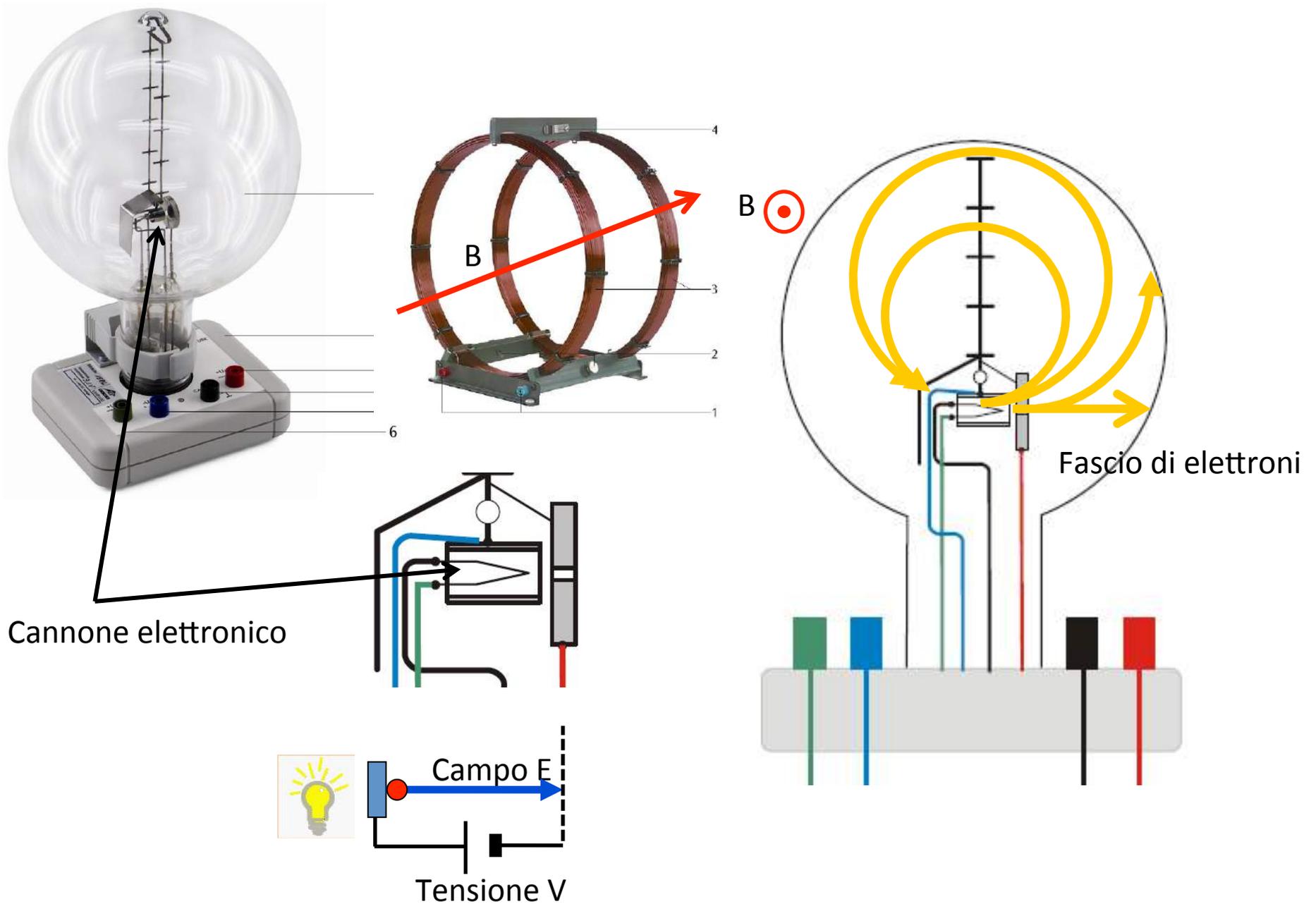


Ogni piano del tipo  $(x, x')$  oppure  $(y, y')$  viene detto **SPAZIO DELLE FASI**

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



# ESPERIMENTO CON TUBO CATODICO: DESCRIZIONE



# ESPERIMENTO CON TUBO CATODICO: CALCOLI

$$\Delta V = 300V$$

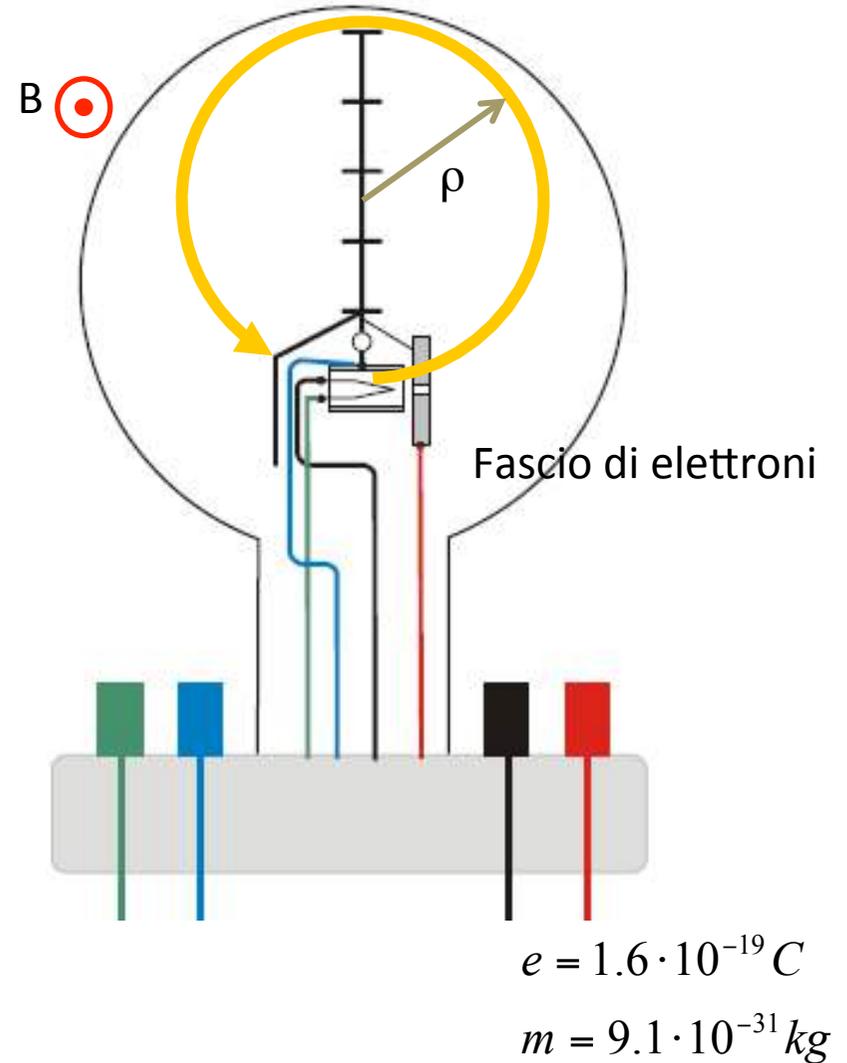
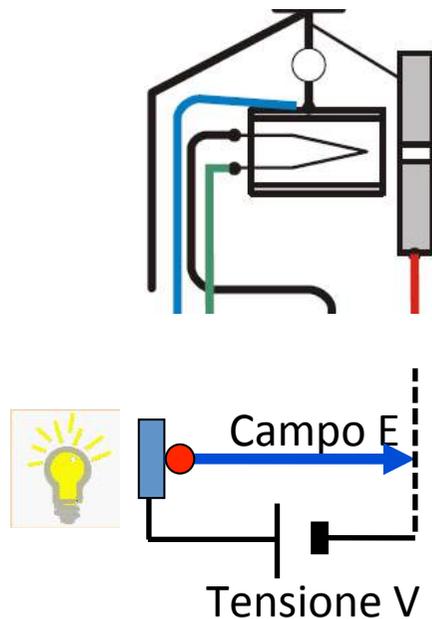
Accelerazione

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

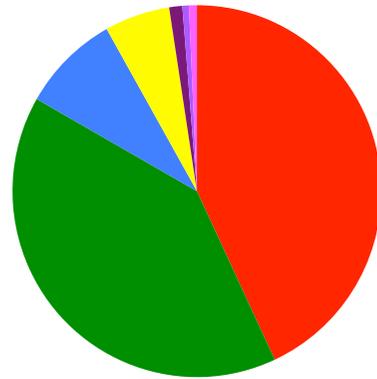
$$\beta = 0.034$$

Deflessione

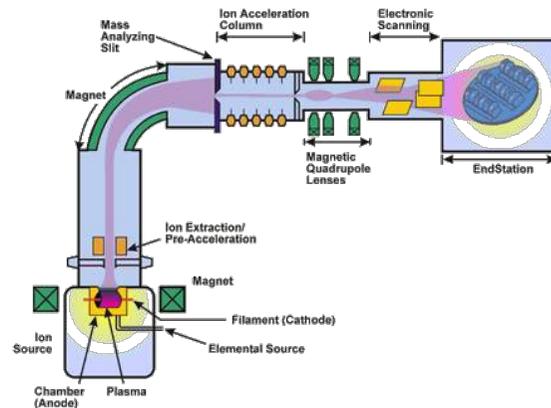
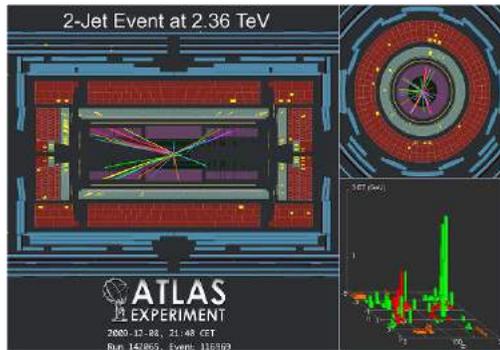
$$B = 2 \cdot 10^{-3} T \Rightarrow \rho = \frac{mv}{Be} \cong 3cm$$



# 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>1GeV)

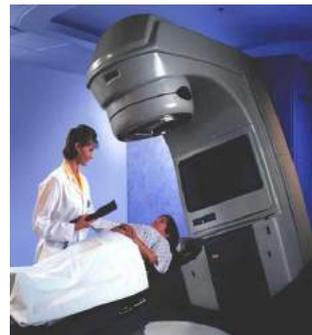
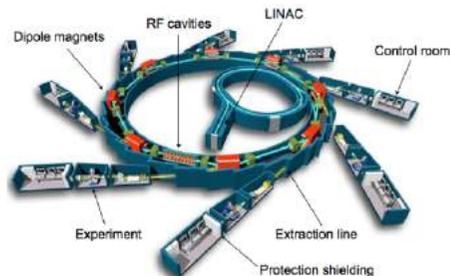


## Industrial Market for Accelerators

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

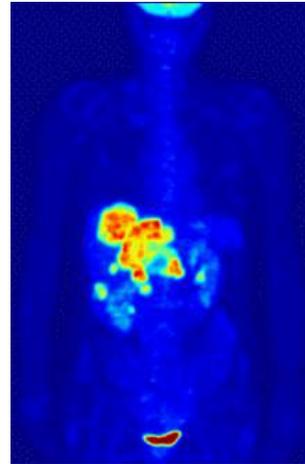
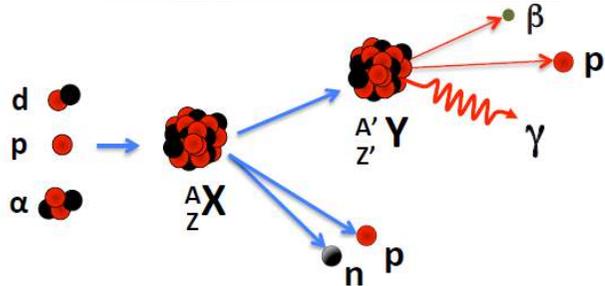
Application	Total systems (2007) approx.	System sold/yr	Sales/yr (M\$)	System price (M\$)
Cancer Therapy	9100	500	1800	2.0 - 5.0
Ion Implantation	9500	500	1400	1.5 - 2.5
Electron cutting and welding	4500	100	150	0.5 - 2.5
Electron beam and X rays irradiators	2000	75	130	0.2 - 8.0
Radio-isotope production (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

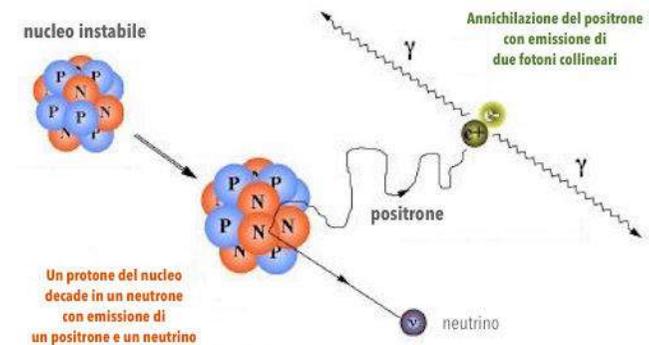
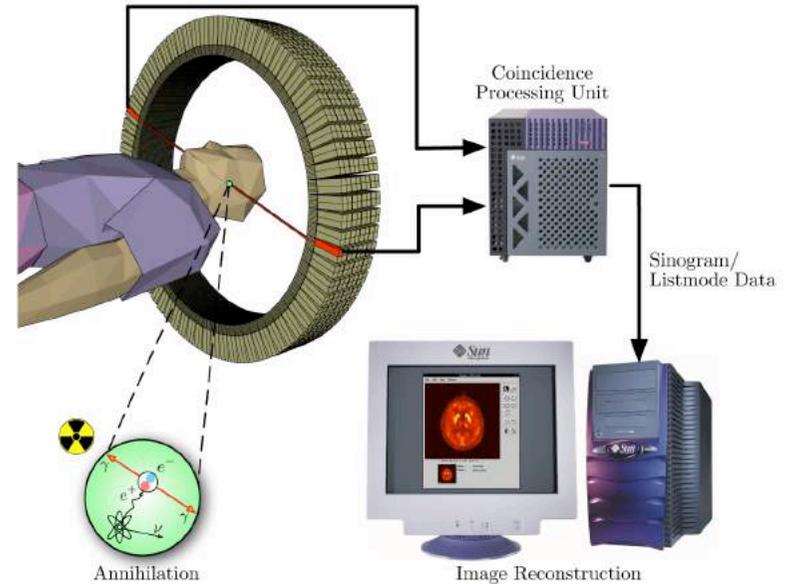


# APPLICAZIONI MEDICHE: PRODUZIONE DI RADIOISOTOPI

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

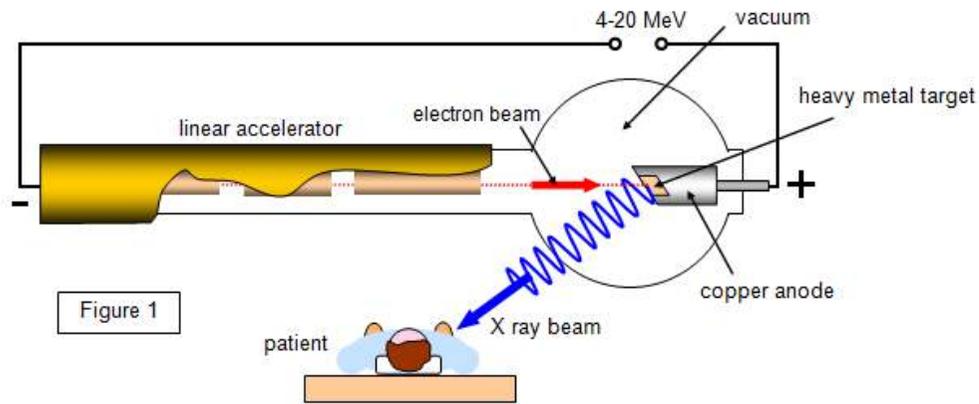


**PET: diagnostica medica (oncologica)**



# APPLICAZIONI MEDICHE: RADIOTERAPIA

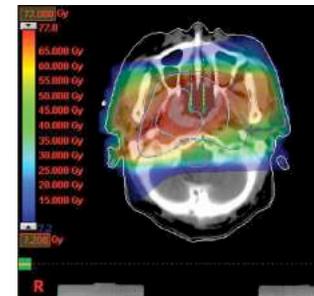
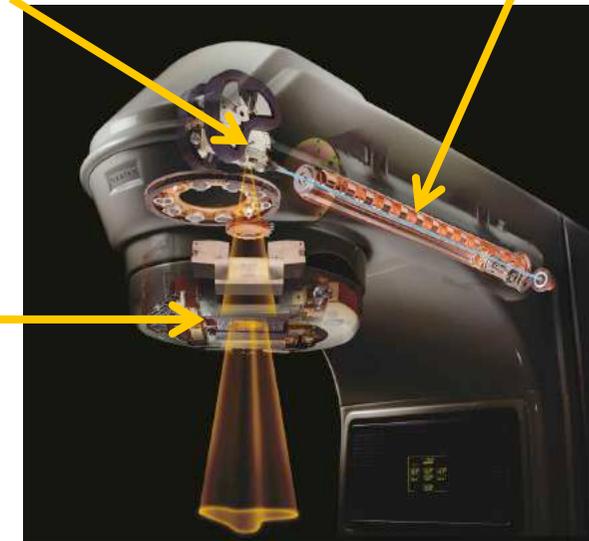
Si irradiano le masse tumorali con fasci di **raggi X** o **elettroni**



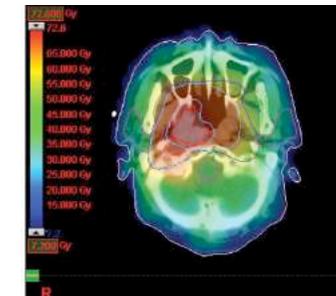
Foglio metallico per la produzione di raggi x

LINAC

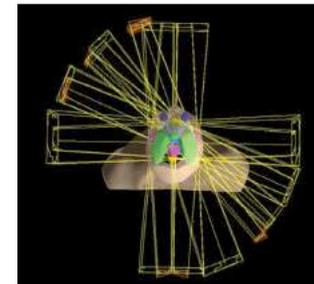
Sistema di collimazione



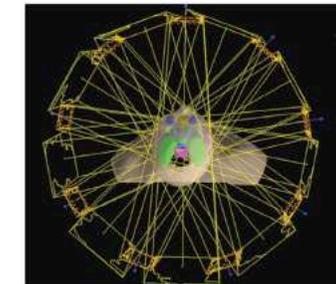
(a)



(b)



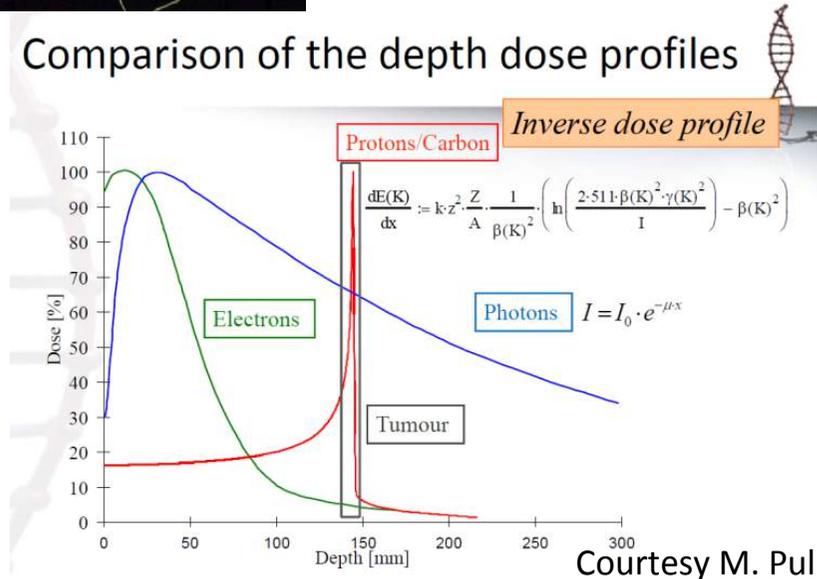
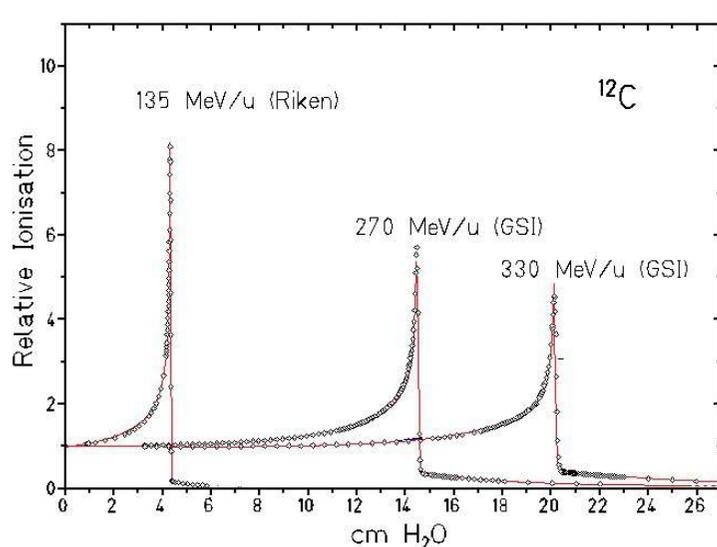
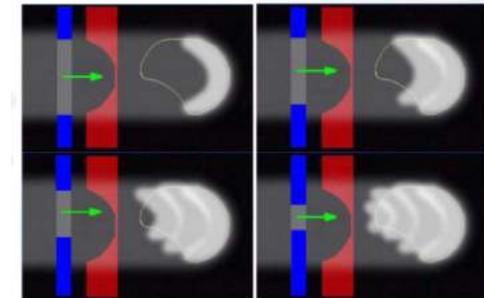
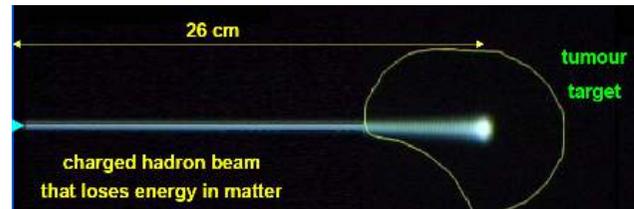
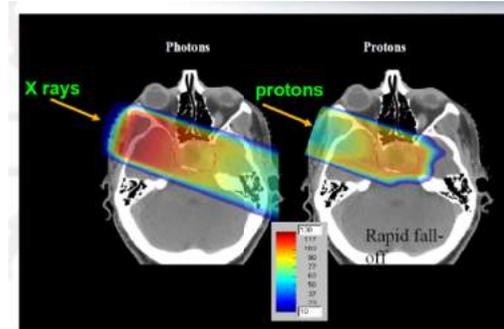
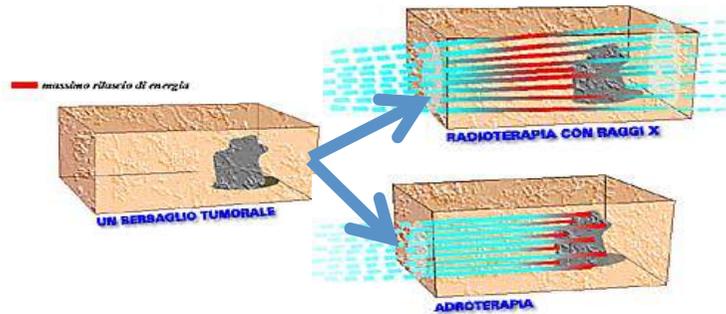
(c)



(d)

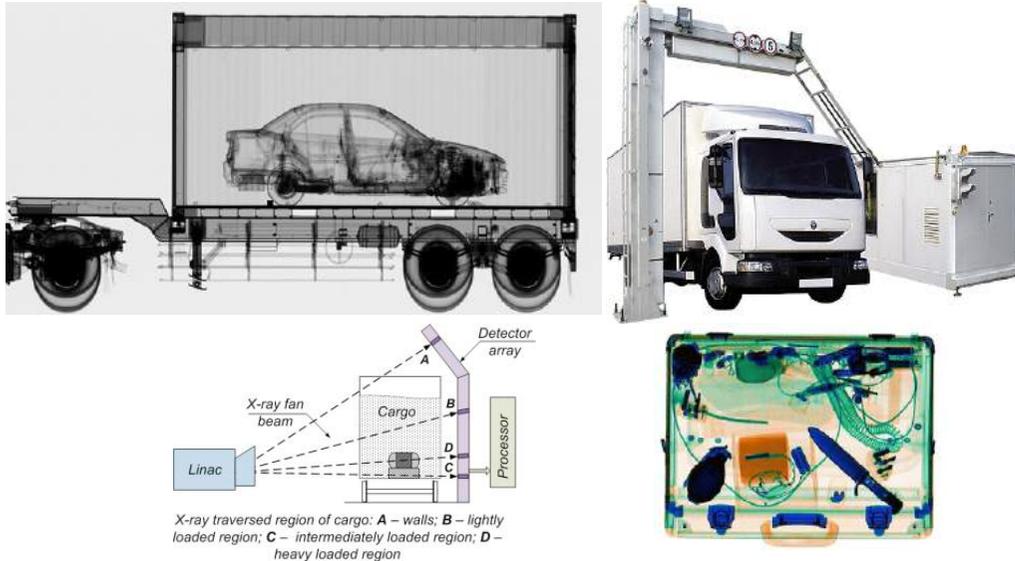
# APPLICAZIONI MEDICHE: ADROTERAPIA

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



# APPLICAZIONI INDUSTRIALI

## Cargo Scan con raggi X



## Trattamento di materiali polimerici: cross-linking

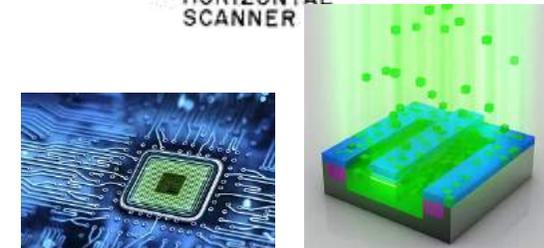
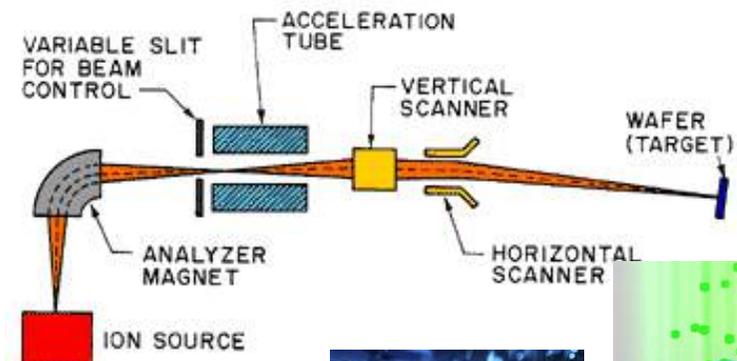
Tali trattamenti industriali aumentano le performances dei materiali in termini di resistenza al calore, elasticità, etc...



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



## Impiantazione ionica (semiconduttori)

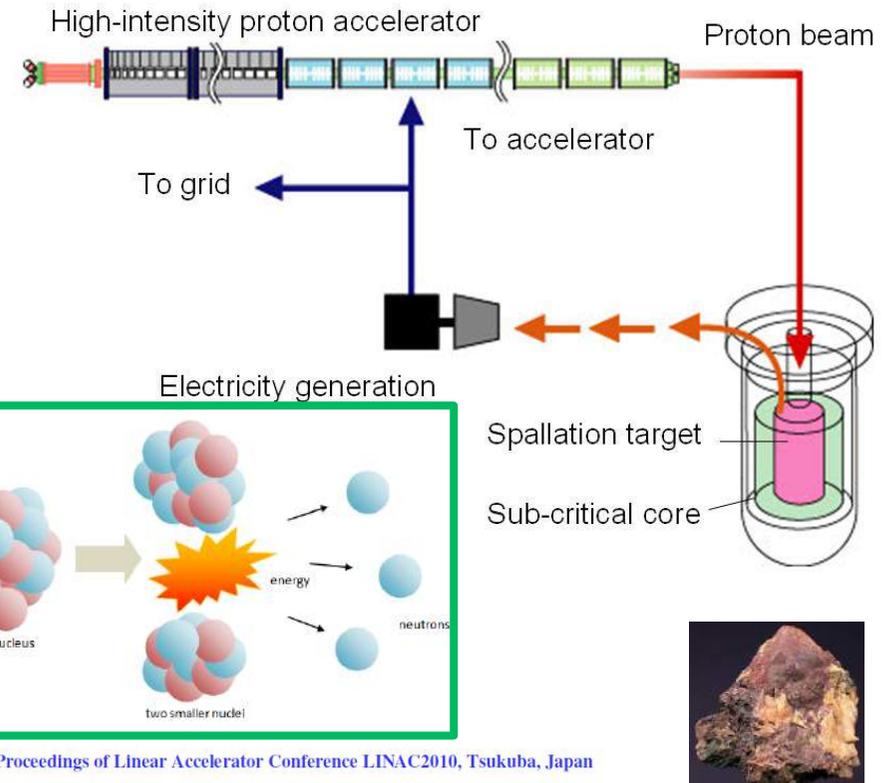


# PRODUZIONE DI ENERGIA CON ACCELERATORI

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

Vantaggi:

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



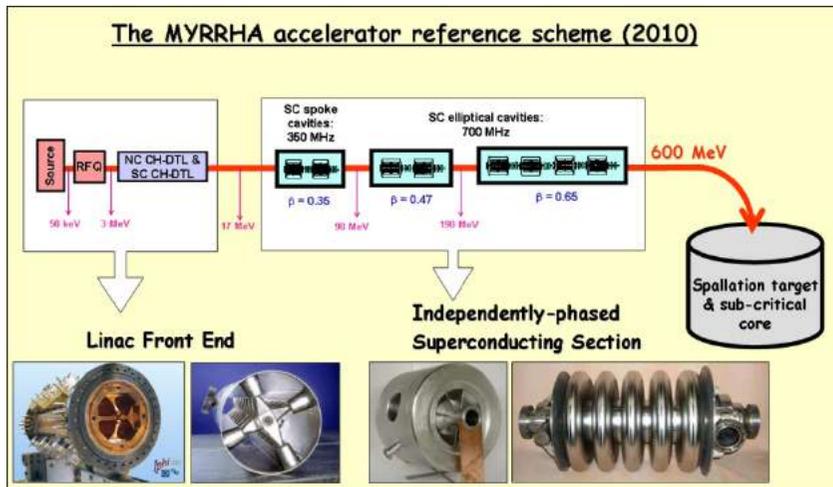
Proceedings of Linear Accelerator Conference LINAC2010, Tsukuba, Japan

## PROTON LINAC FOR ADS APPLICATION IN CHINA

Shinian Fu, Shouxian Fang, Jiuqing Wang  
 IHEP, Institute of High Energy Physics, Beijing 100049, China  
 Xialing Guan  
 CIAE, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China

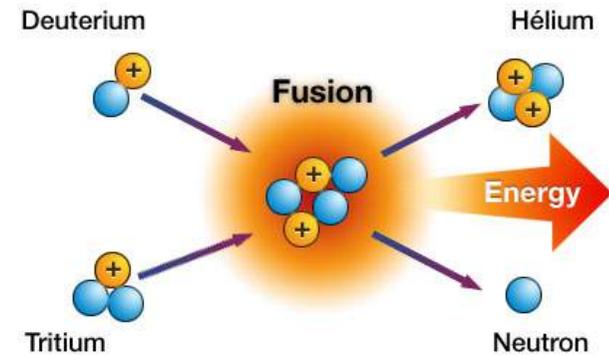
Alcuni esperimenti di laboratorio e molti studi teorici hanno dimostrato la possibilità teorica di tale impianto. **Carlo Rubbia**, è stato uno dei primi a concepire un progetto di un reattore subcritico, il cosiddetto "**amplificatore di energia**".

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

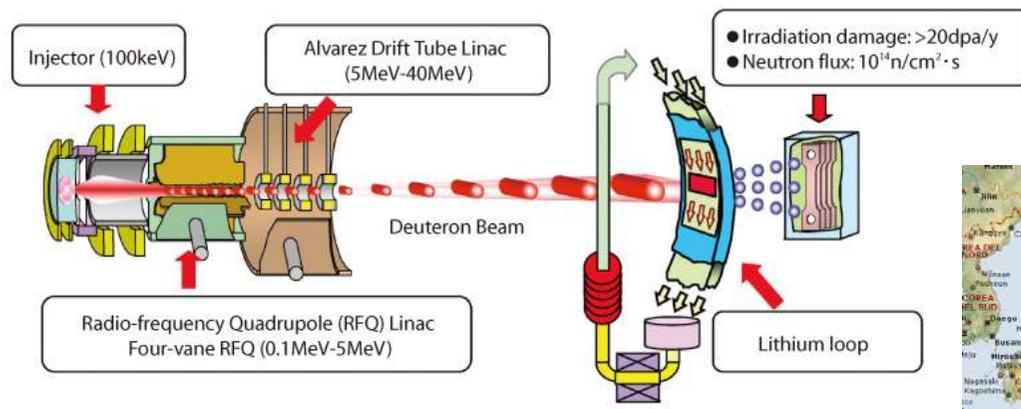
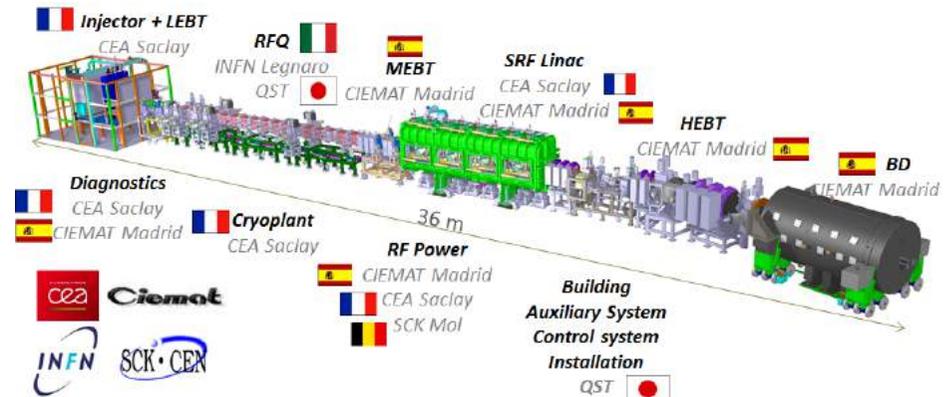


# TEST DI MATERIALI PER REATTORI A FUSIONE NUCLEARE

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

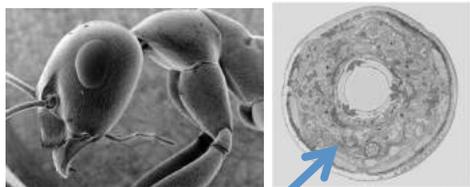


L'**International Fusion Materials Irradiation Facility (IFMIF)**, è un **impianto di test di materiali** utilizzabili in un reattore di fusione. E' una **sorgente di neutroni** basata sul un acceleratore di deuterio che collidendo contro atomi di **litio** produce un flusso di neutroni analogo a quello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



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

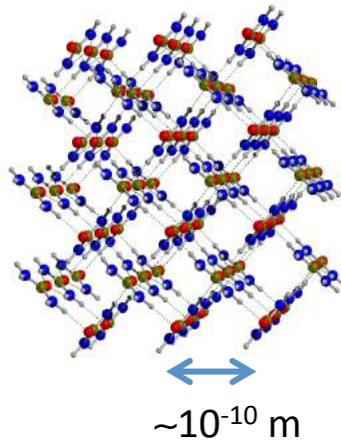
Luce visibile:  
400-700 nm ( $\sim 10^{-7}$  m)



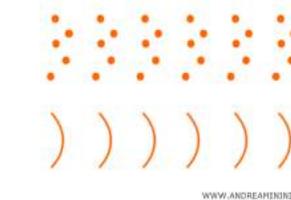
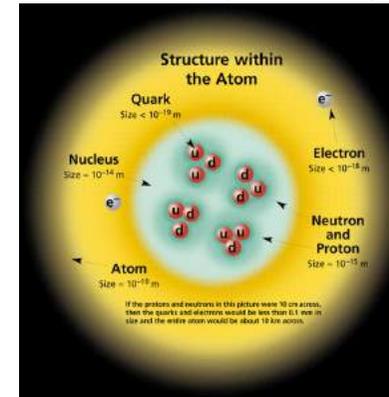
1-10  $\mu$ m

Risoluzione 200 nm

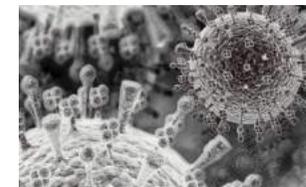
Raggi X:  
0.01-10 nm ( $\sim 10^{-11}$ - $10^{-8}$  m)



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



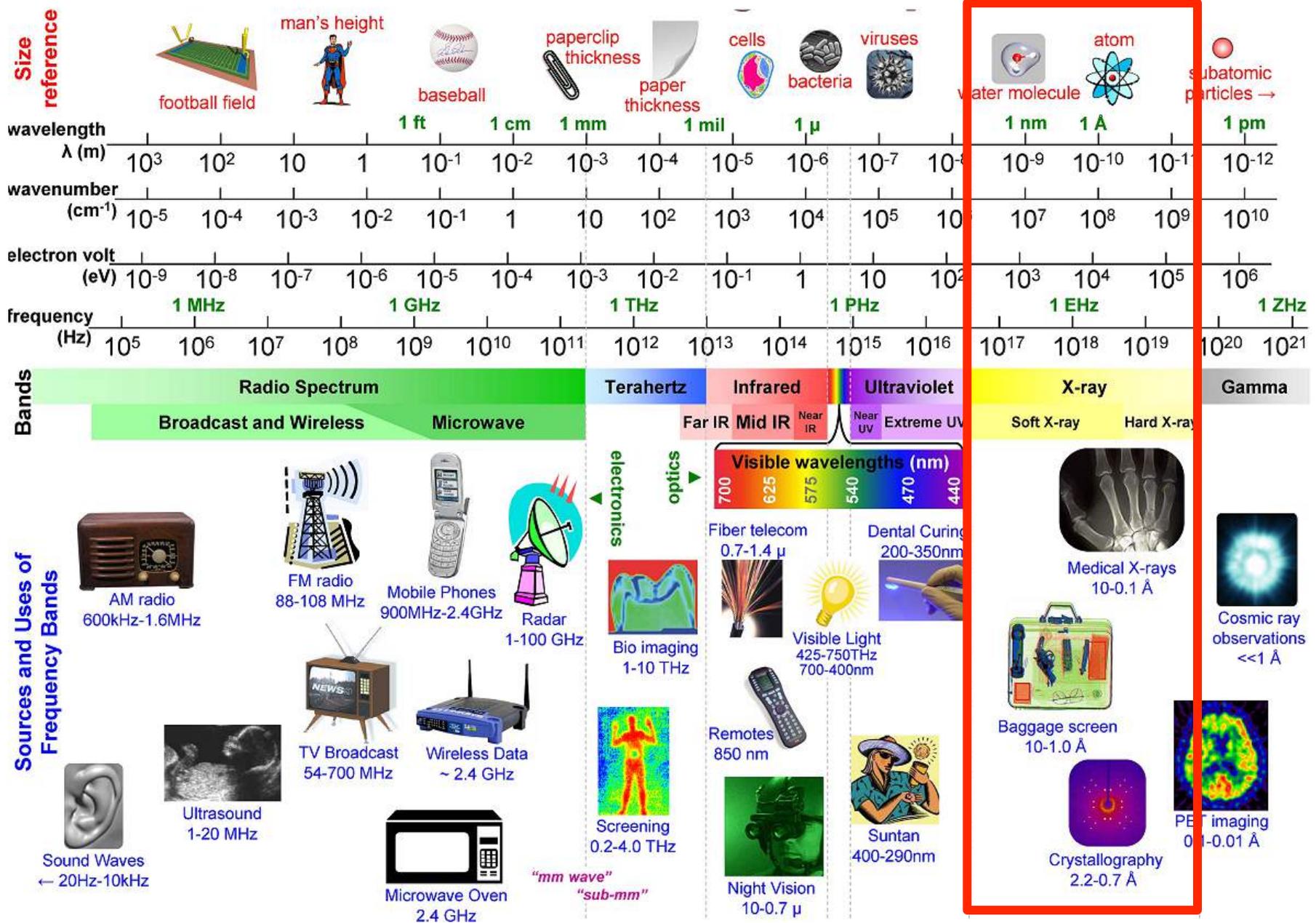
$$\lambda = h/p$$



FOTONI

PARTICELLE IN GENERALE

# LUCE A DIVERSA LUNGHEZZA D'ONDA: RAGGI X

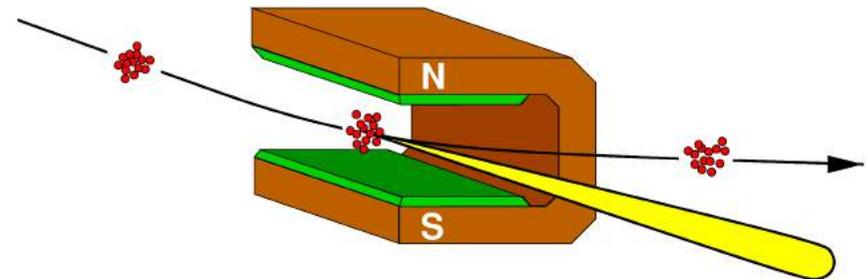
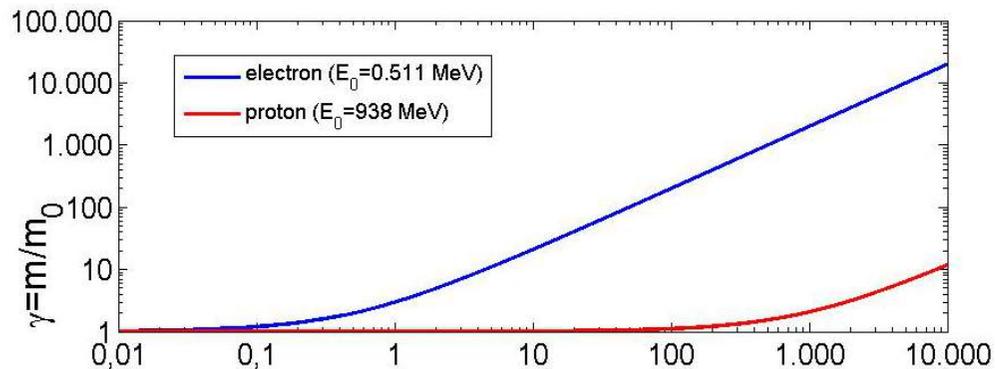
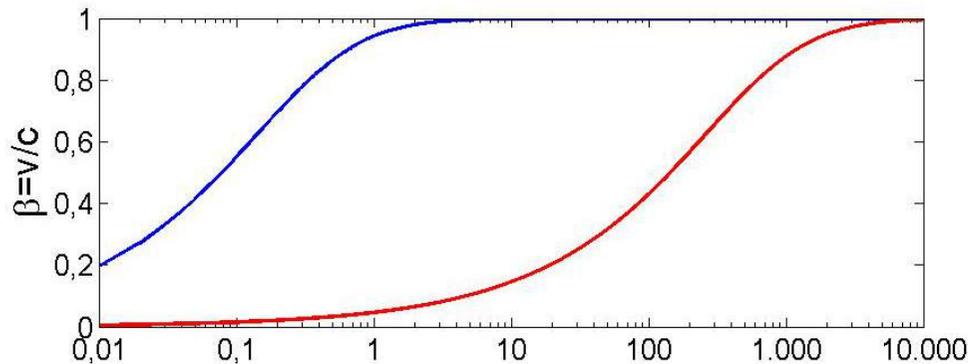
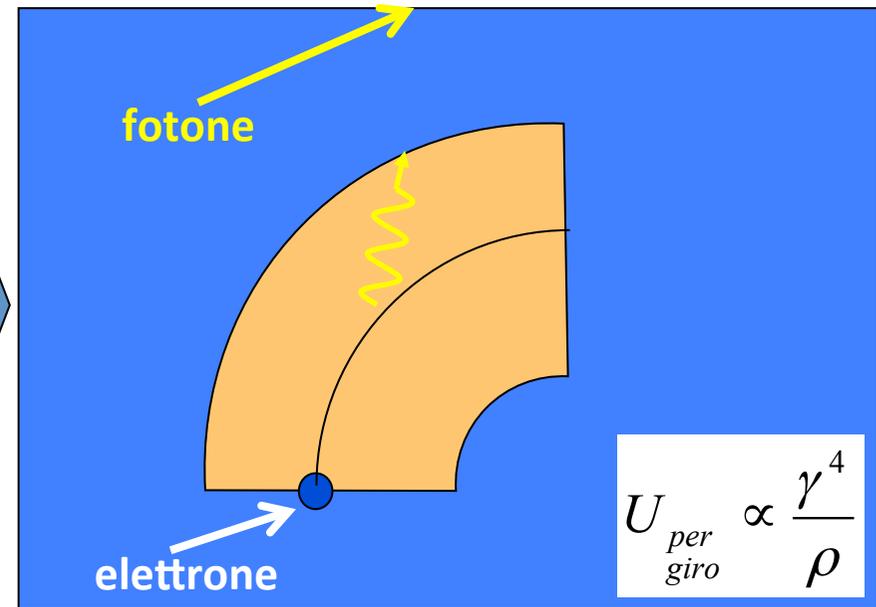


# LE PARTICELLE IN MOVIMENTO POSSONO EMETTERE RAGGI X?

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

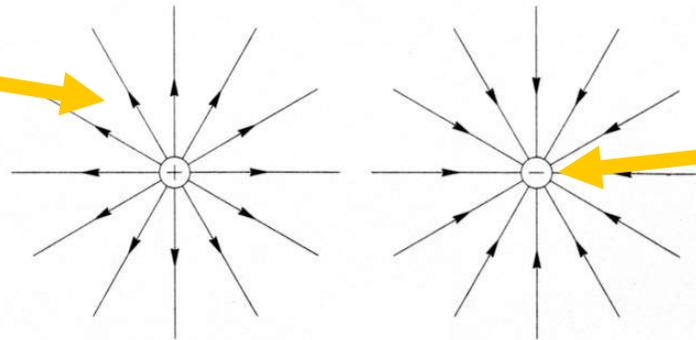
Tale fenomeno è tanto più accentuato quanto più la particella è relativistica ( $\gamma > 1$ ) ovvero si muove a **velocità prossime a quella della luce**.

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

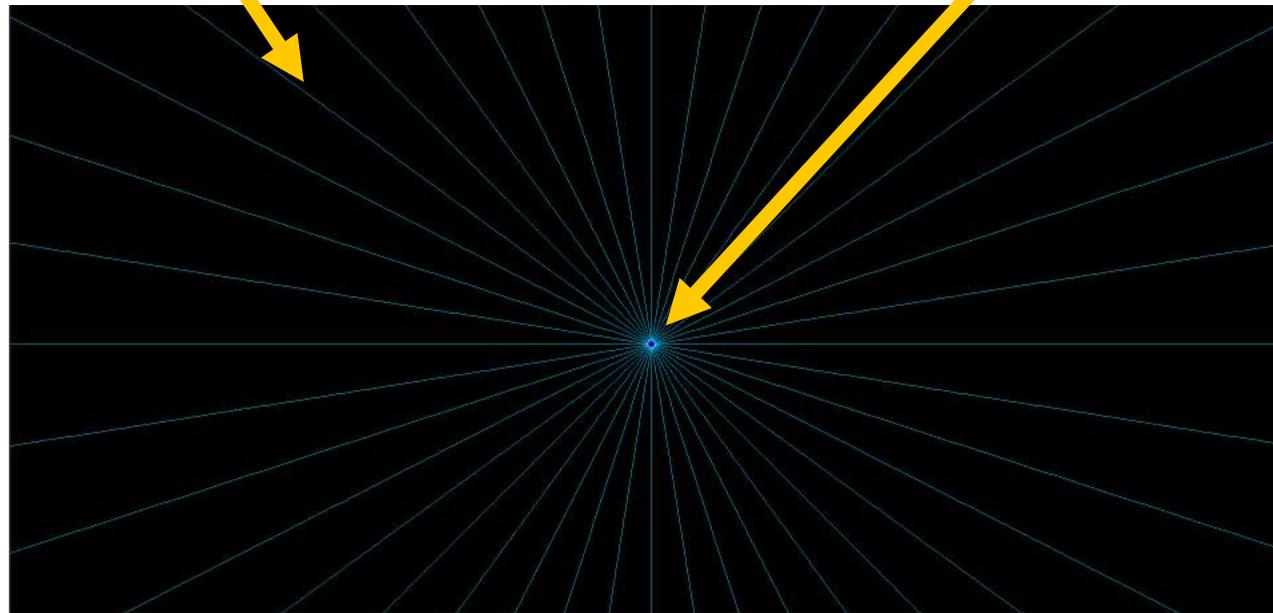


# RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE

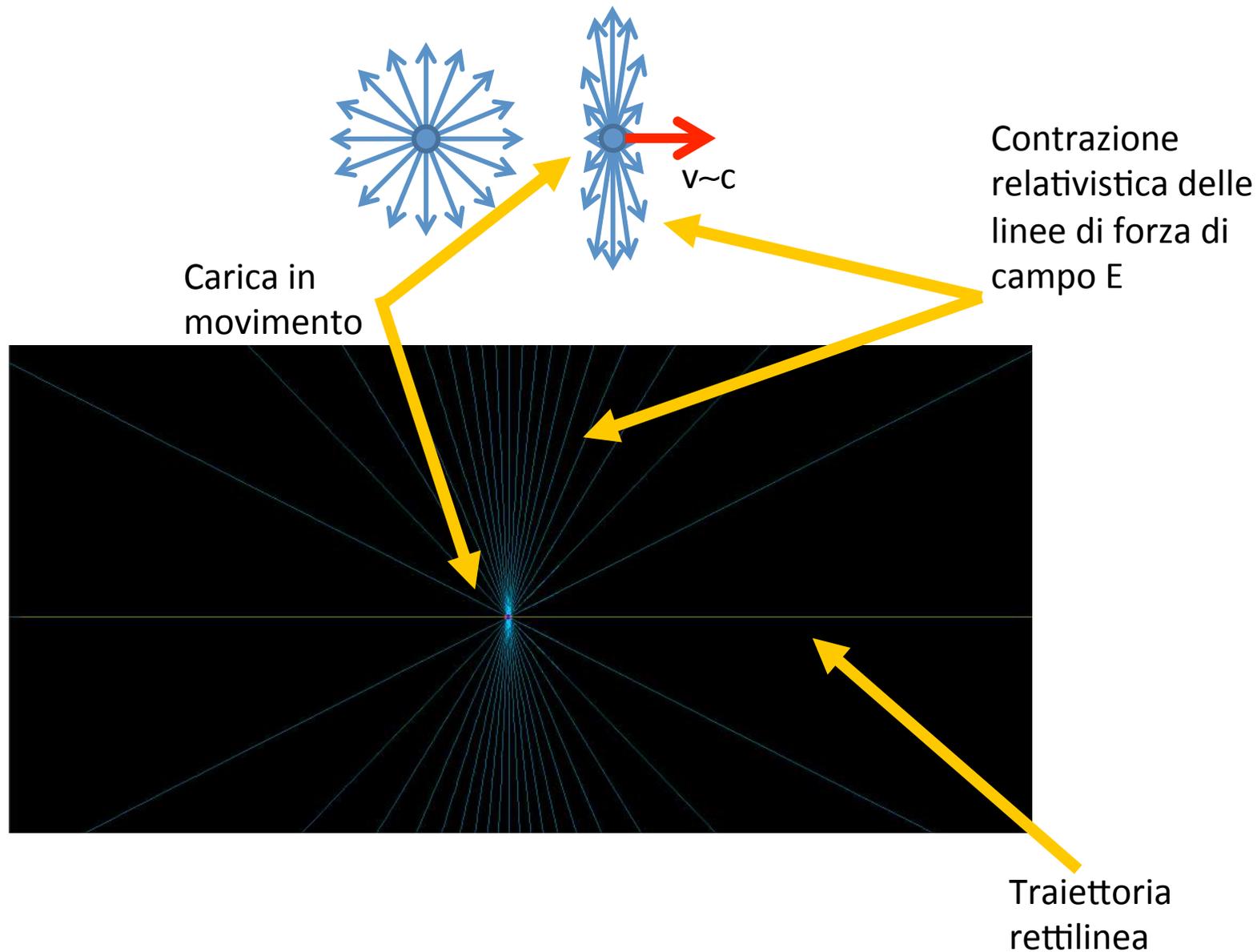
Campo elettrico



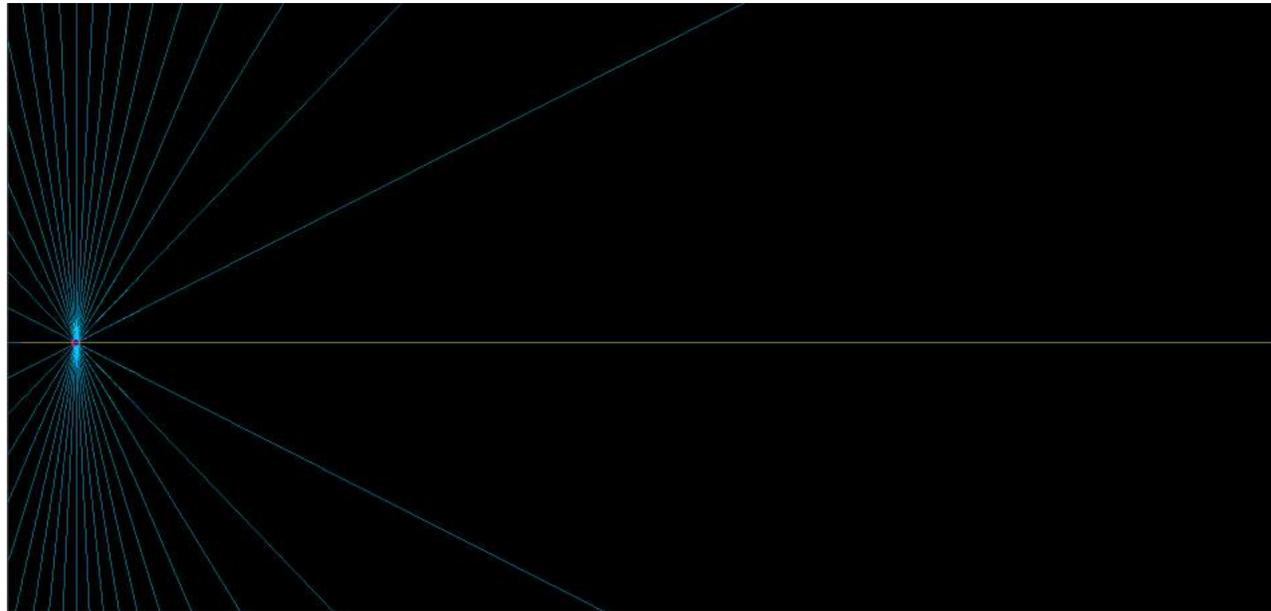
Carica ferma



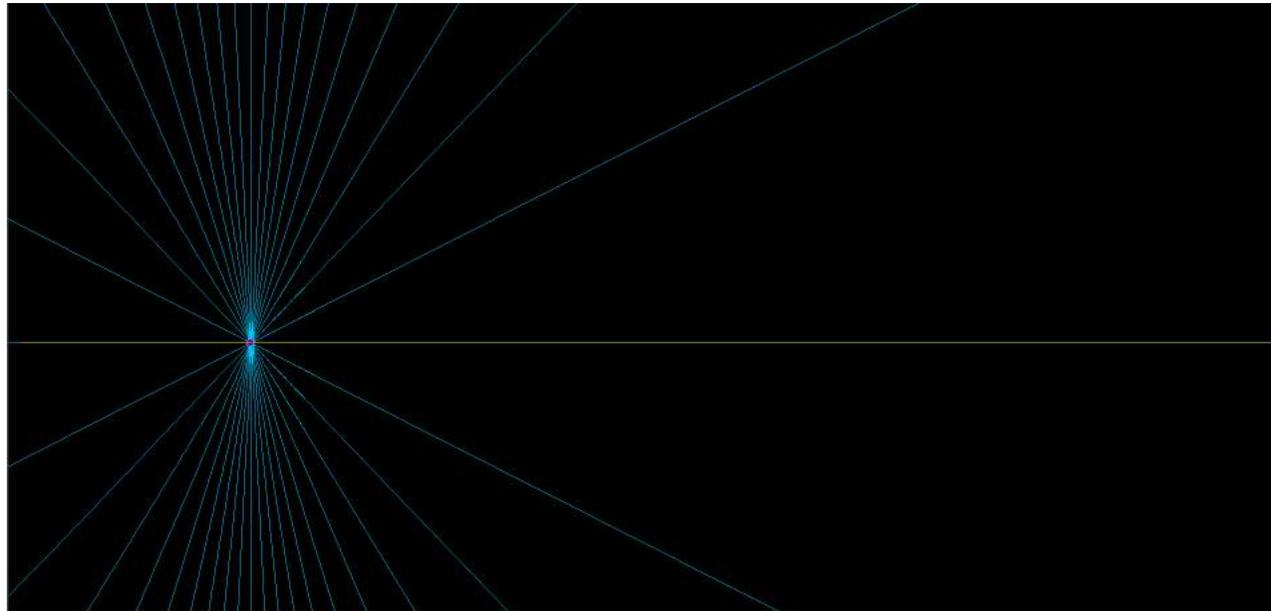
# RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE



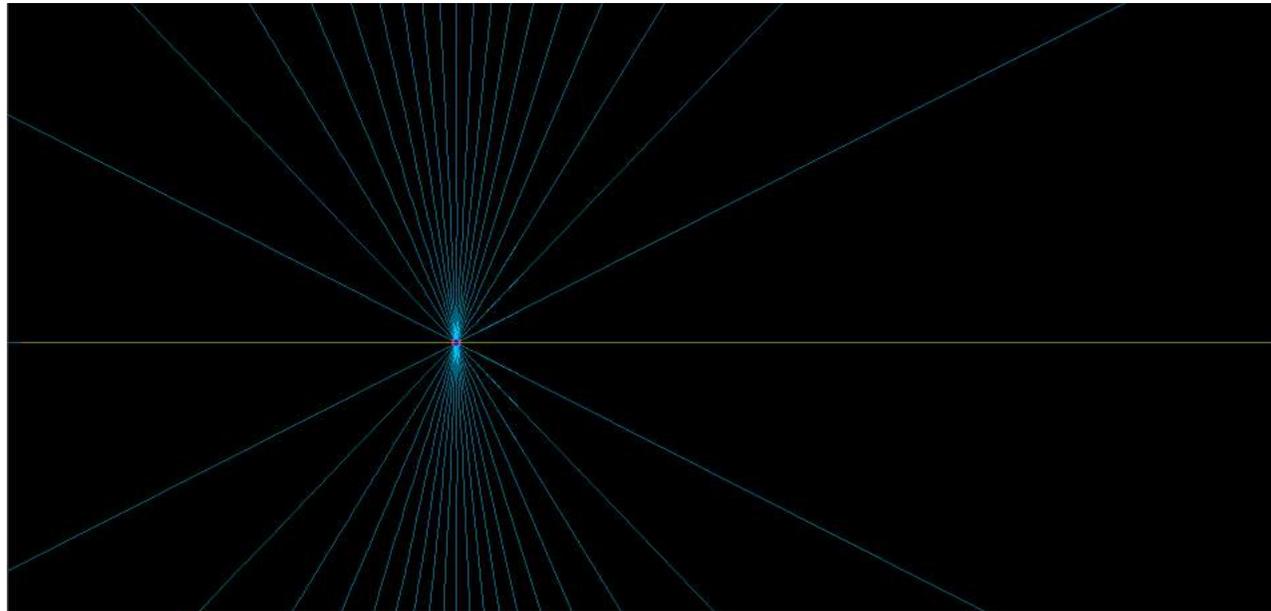
# RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE



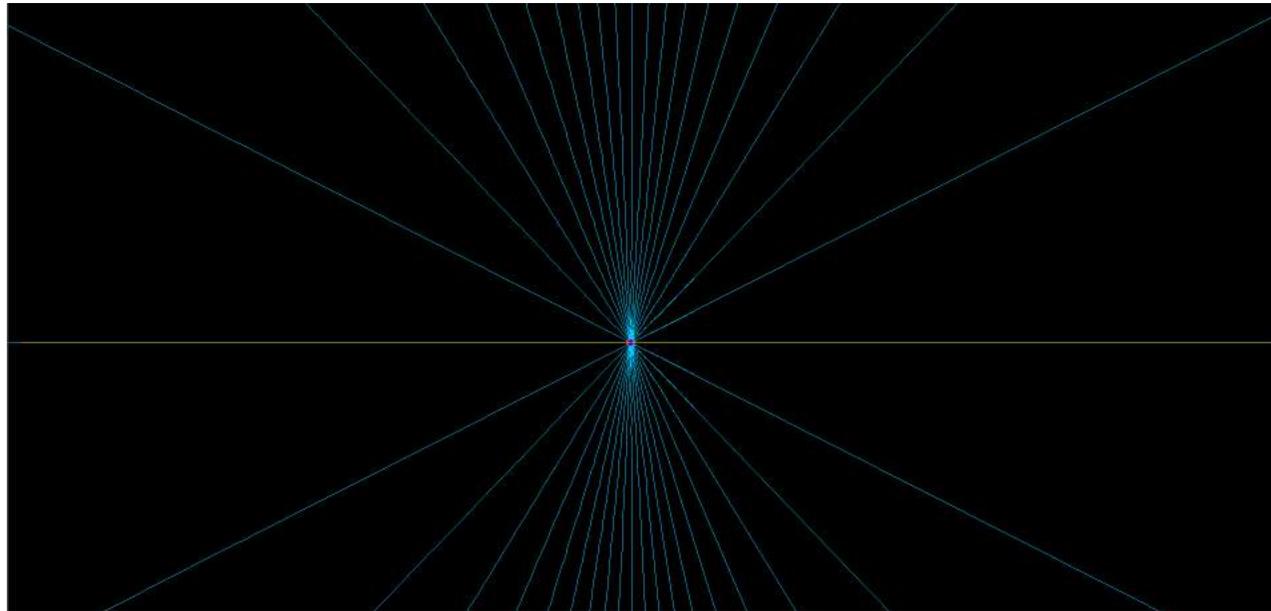
# RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE



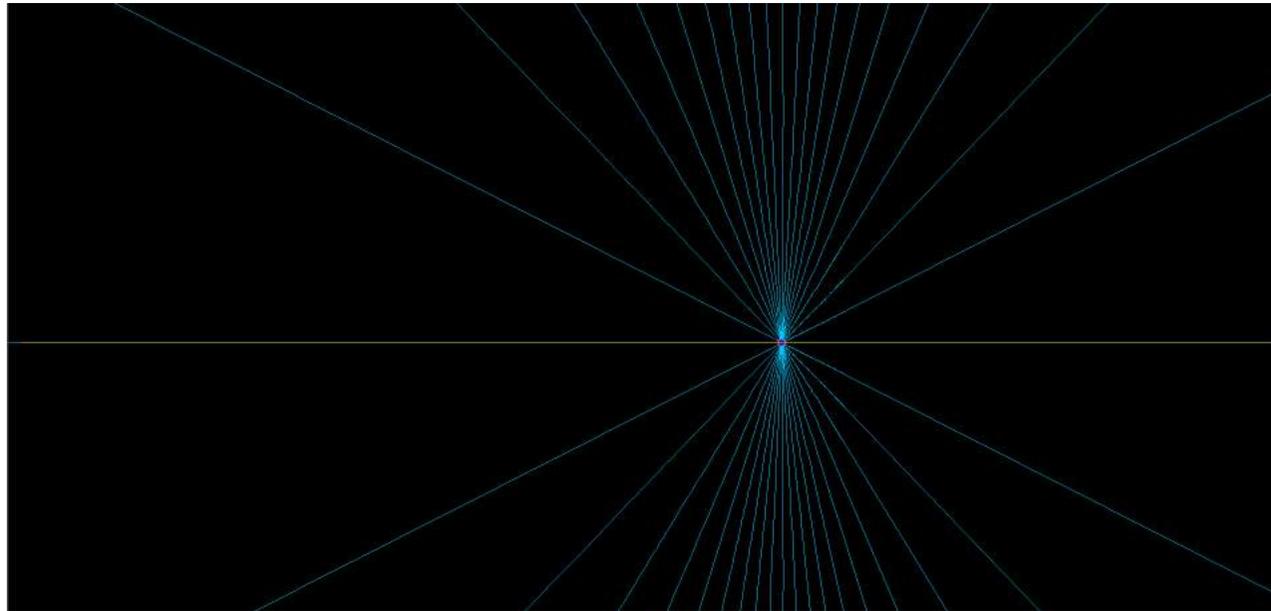
# RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE



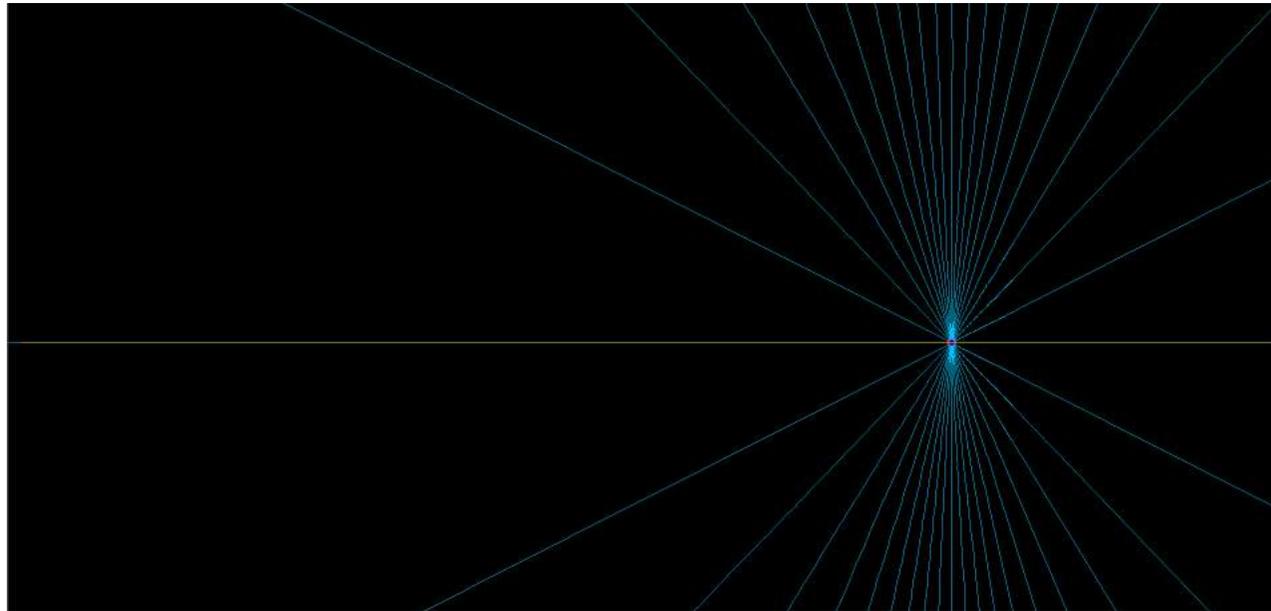
# RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE



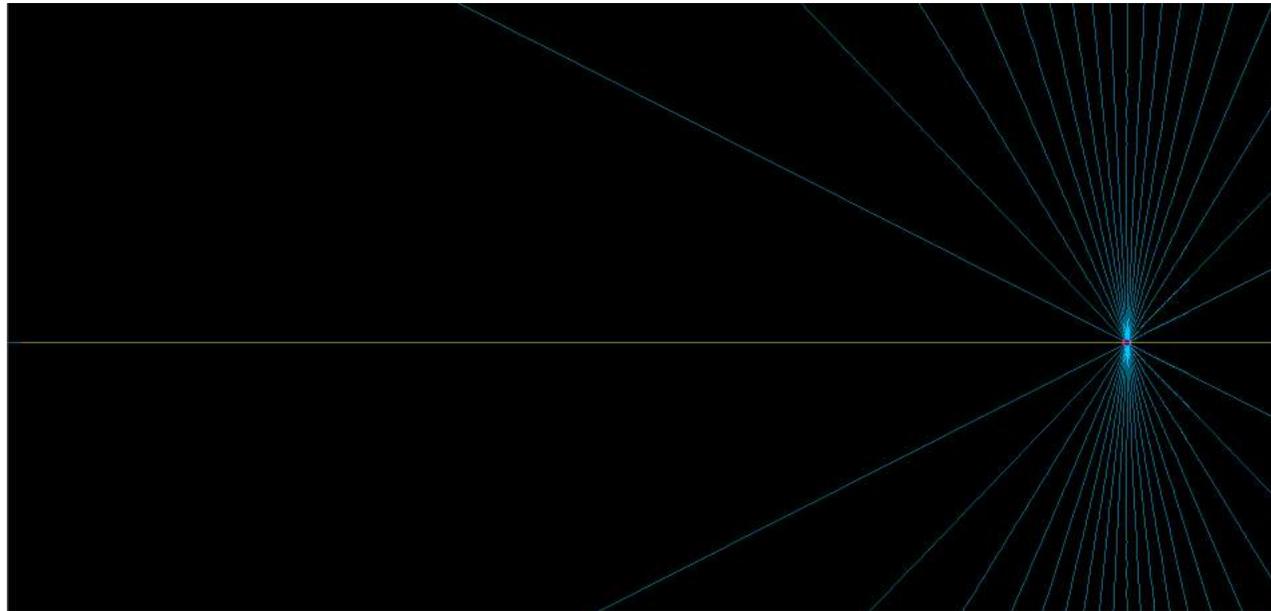
# RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE



# RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE



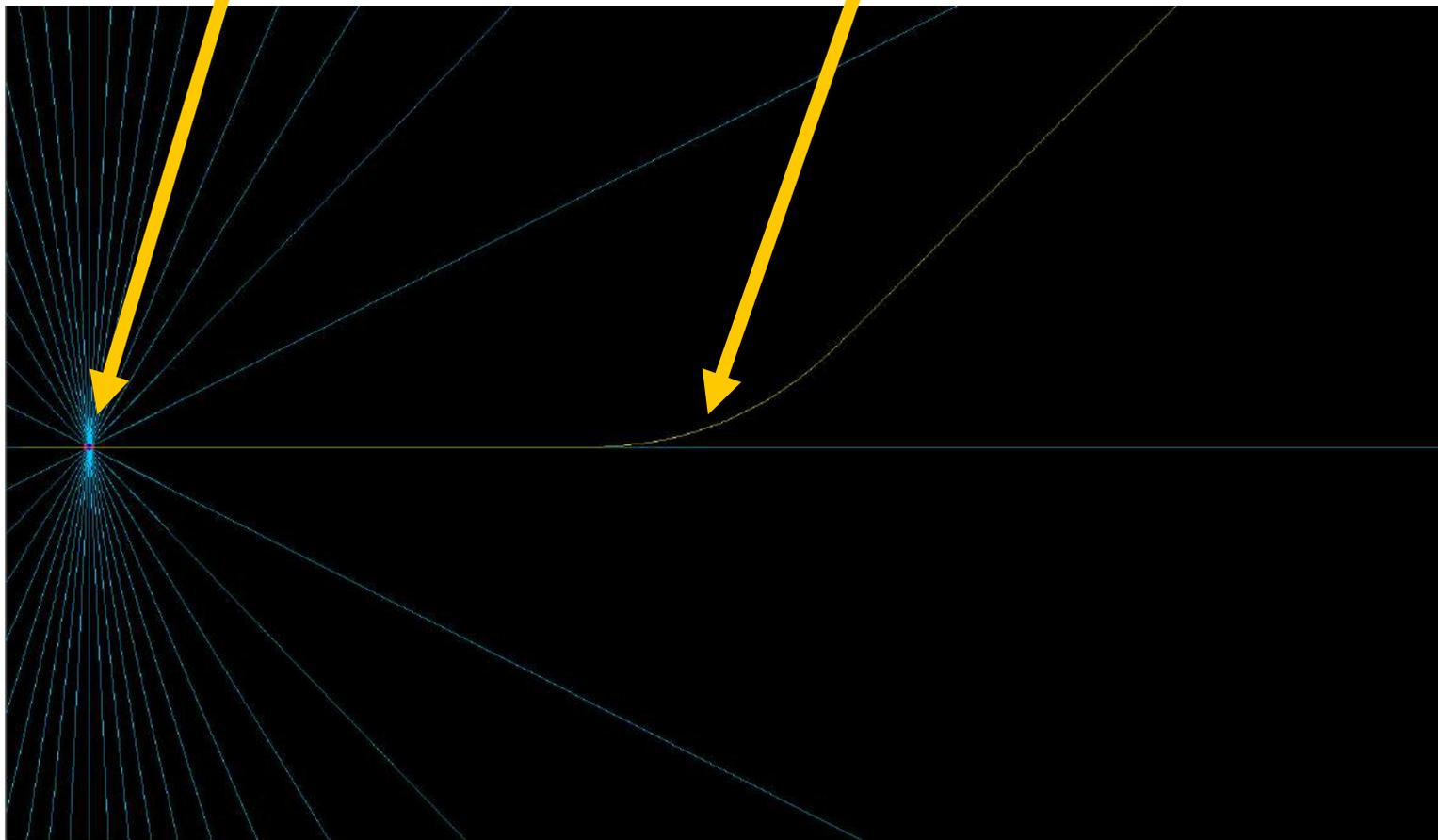
# RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE



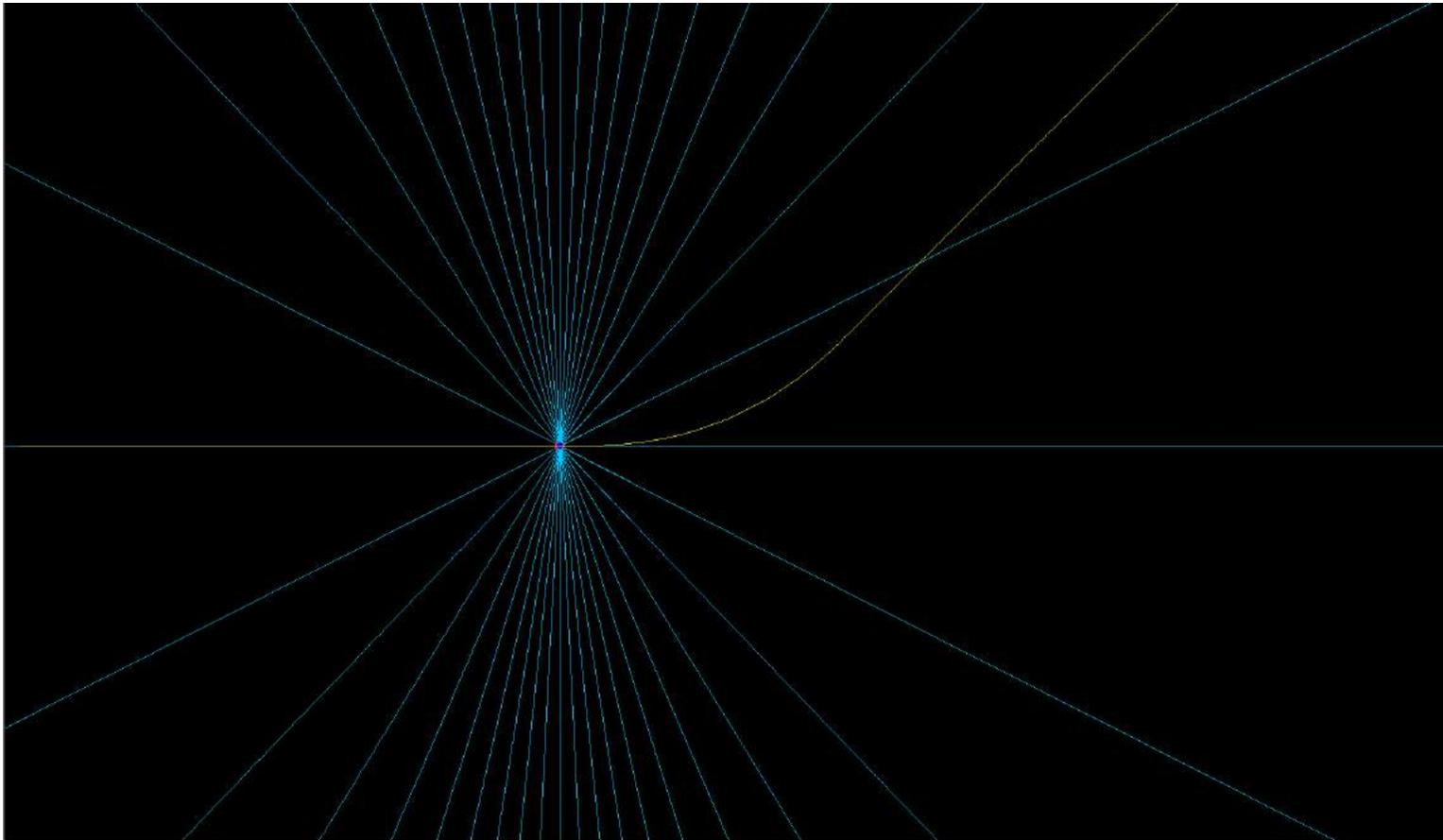
# RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: DIPOLO

Carica in movimento

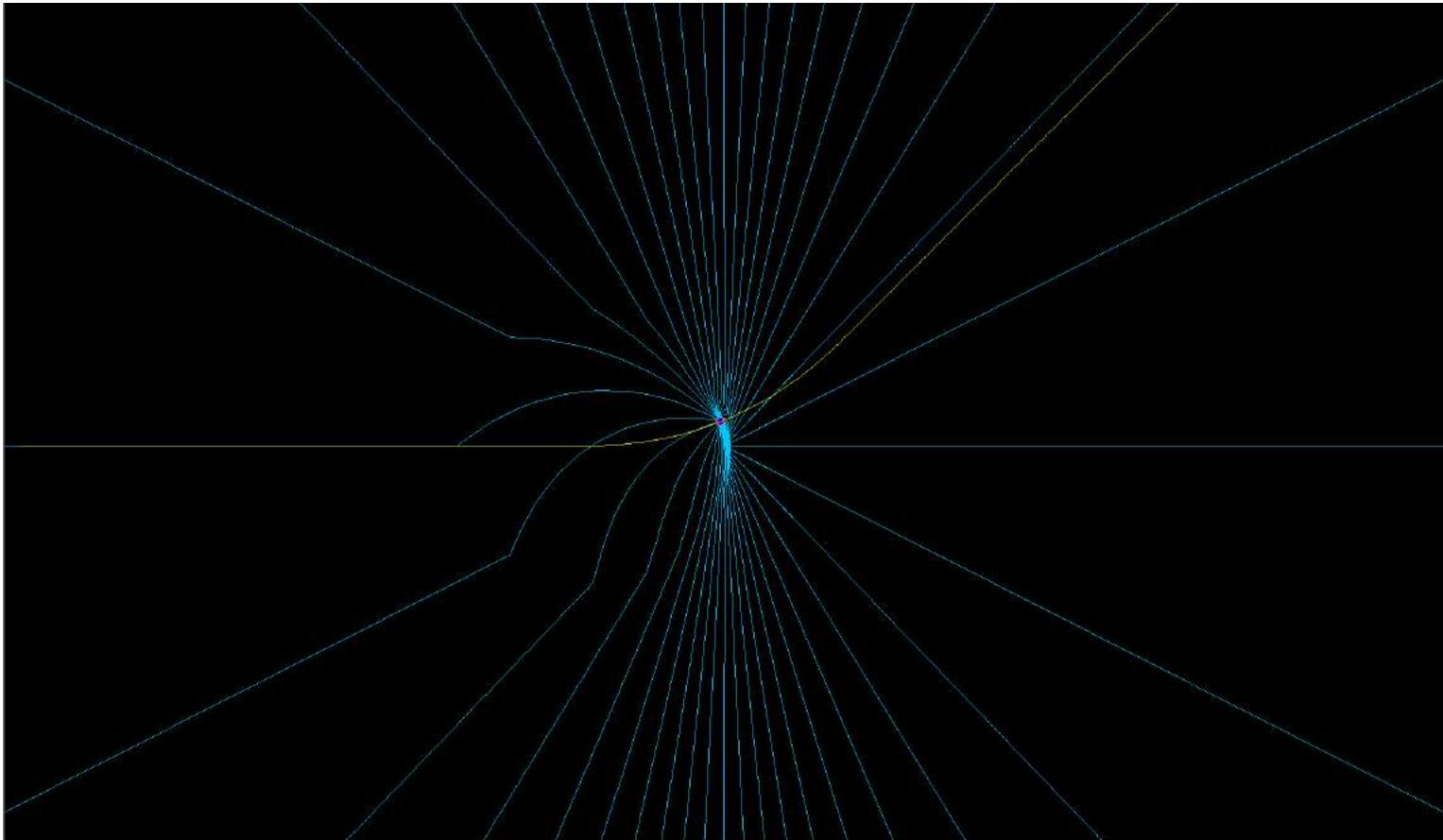
Traiettoria  
generata da un  
dipolo



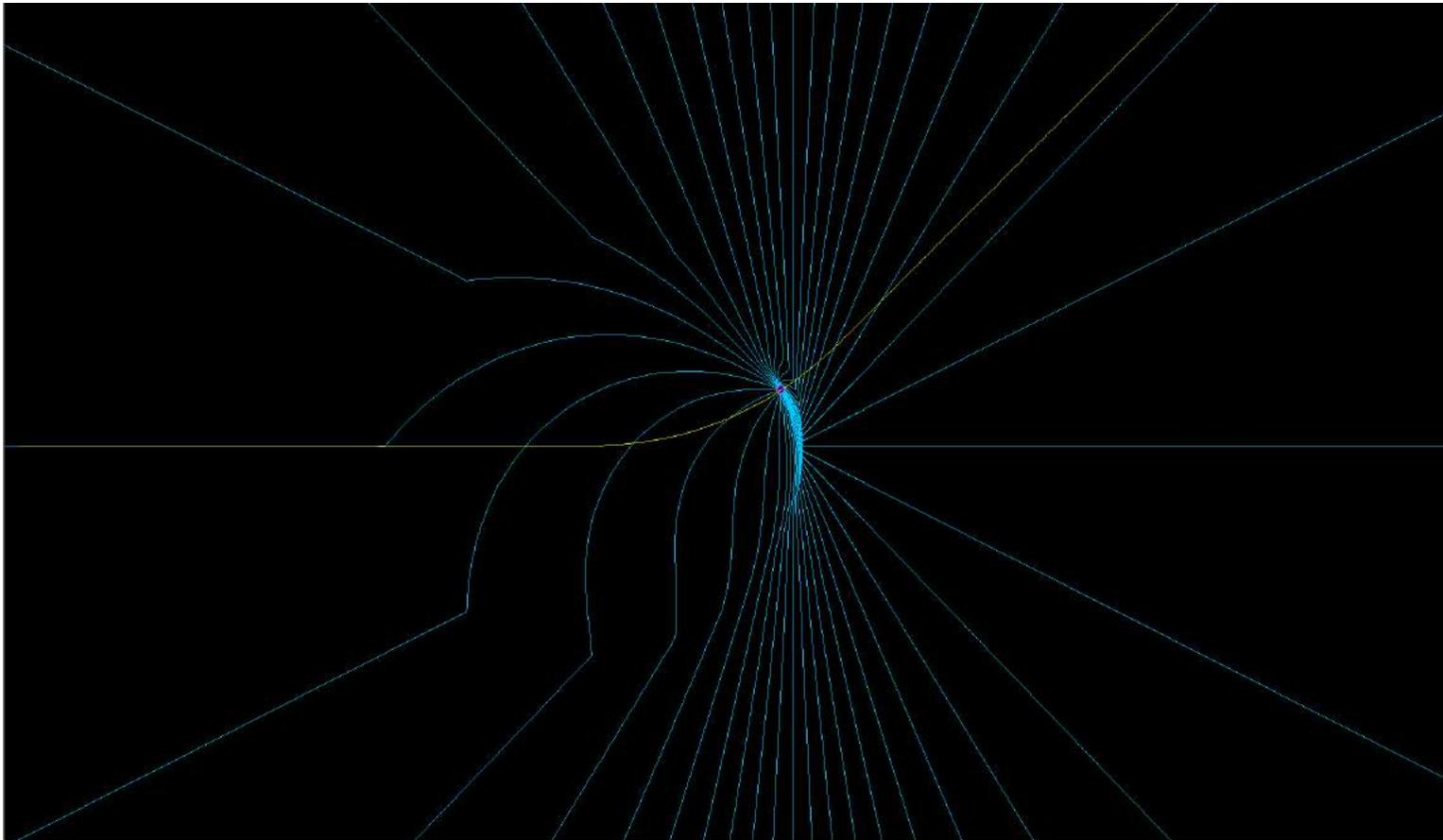
# RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: DIPOLO



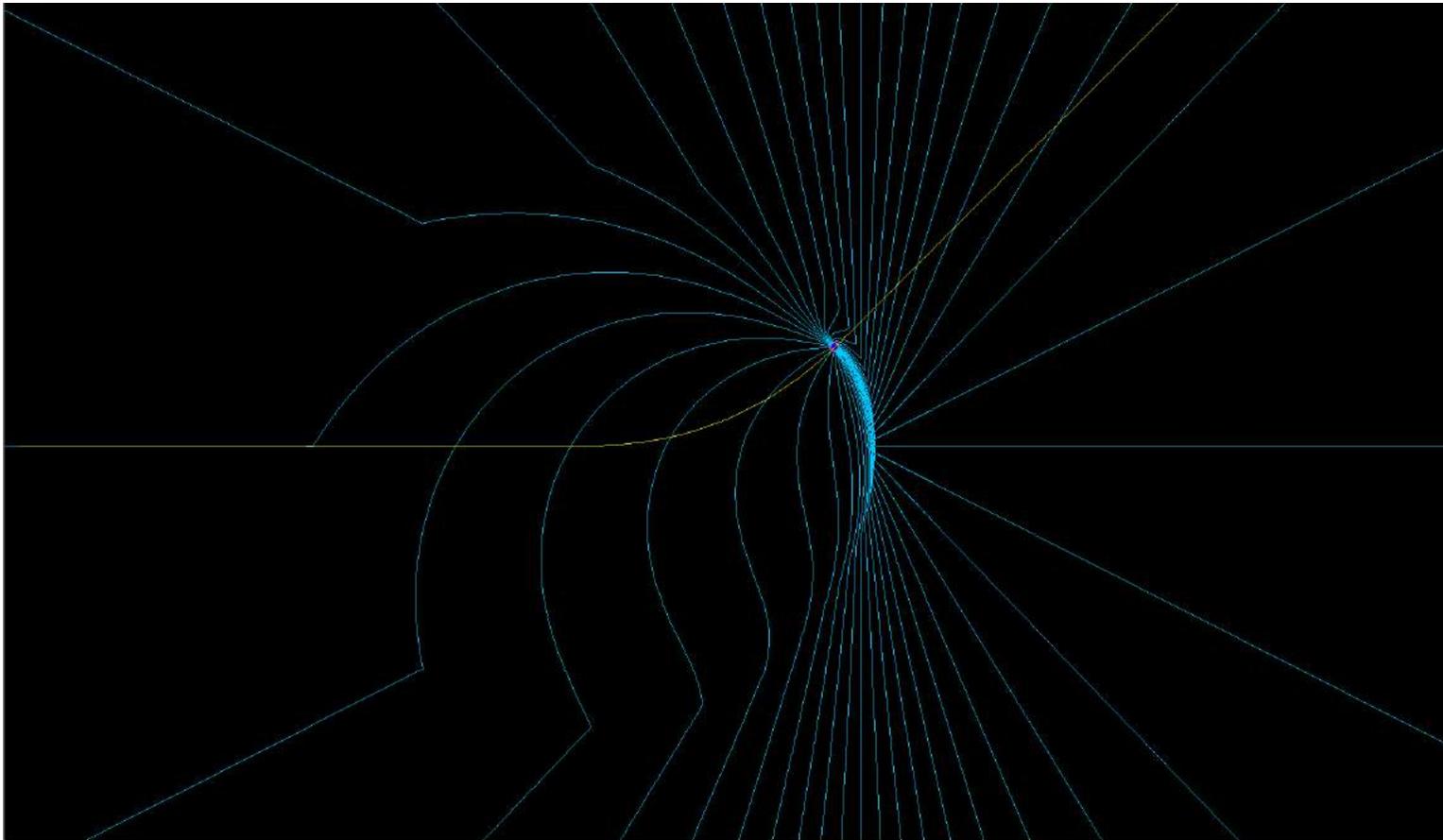
# RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: DIPOLO



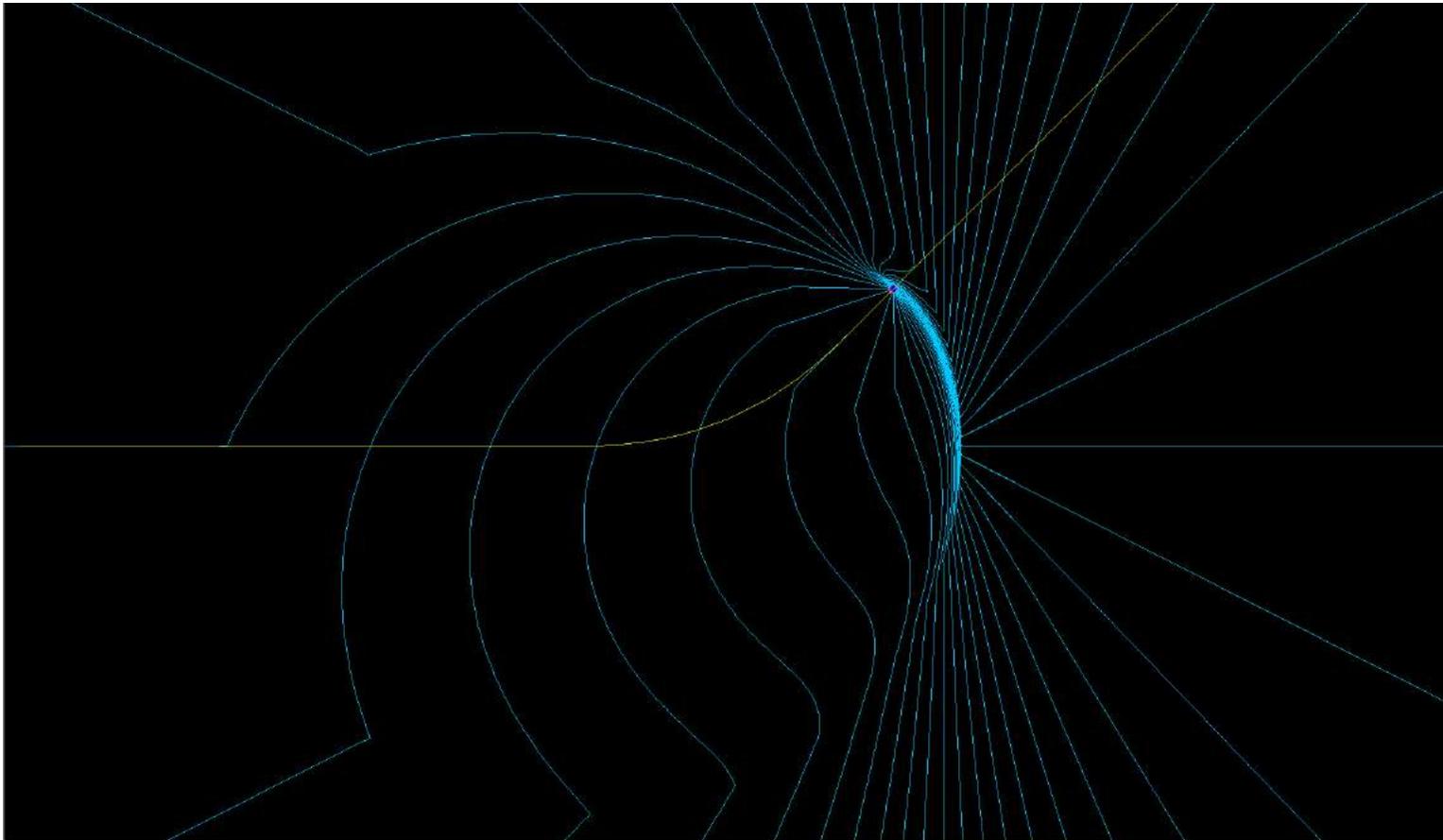
# RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: DIPOLO



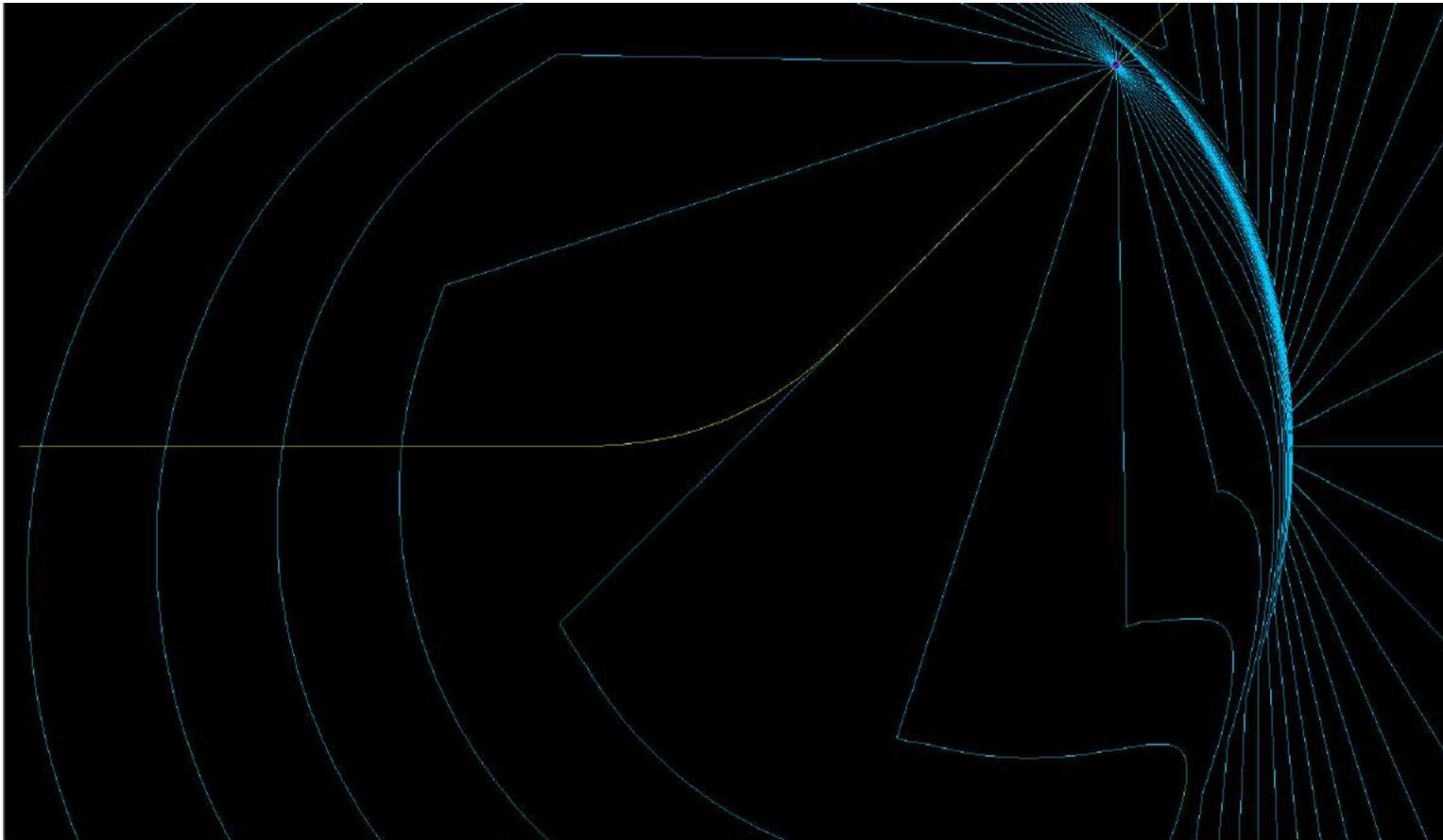
# RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: DIPOLO



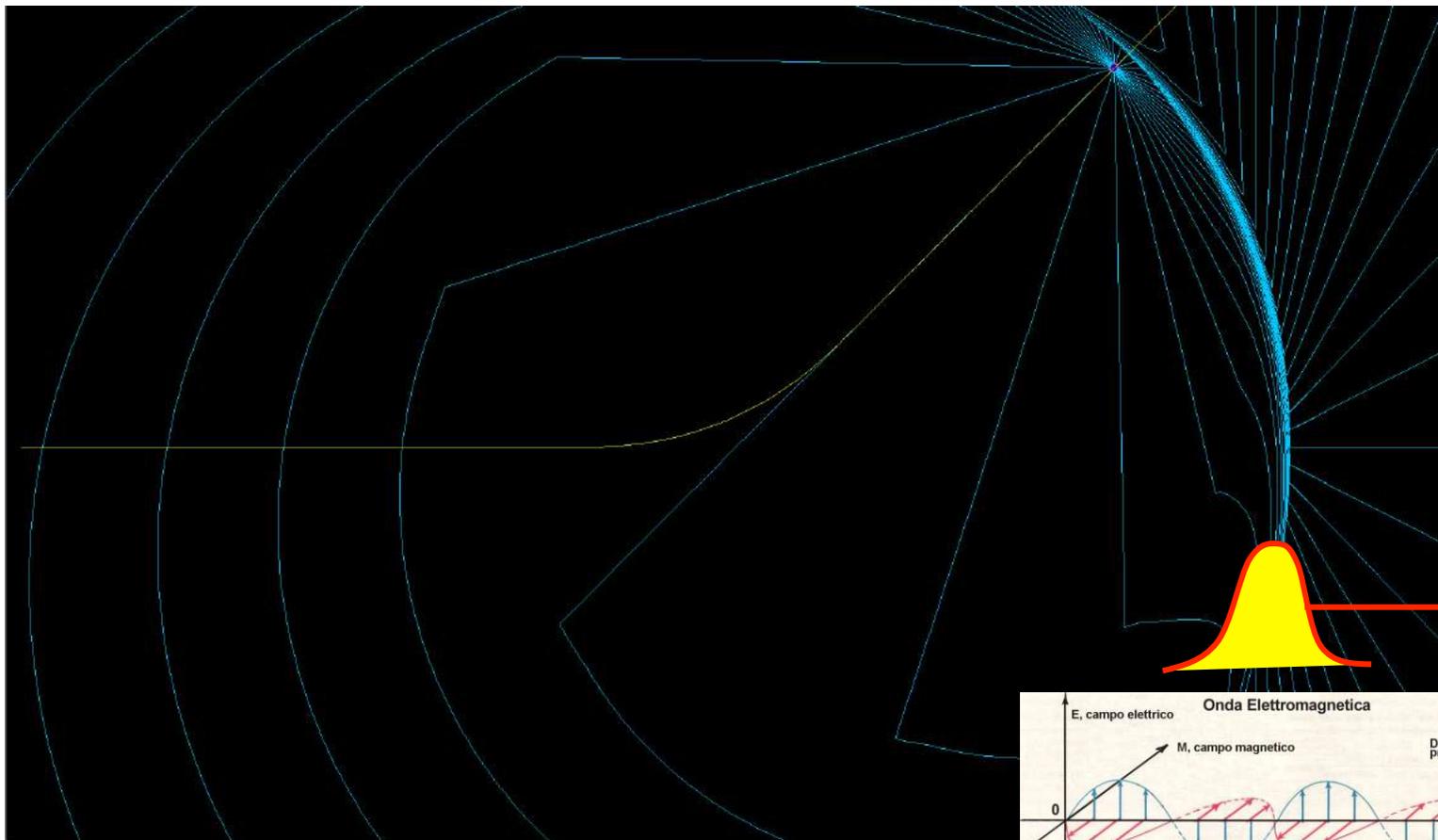
# RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: DIPOLO



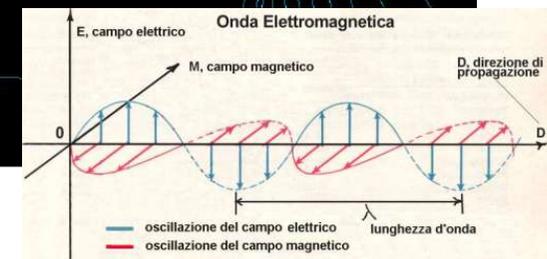
# RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: DIPOLO



# RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: DIPOLO

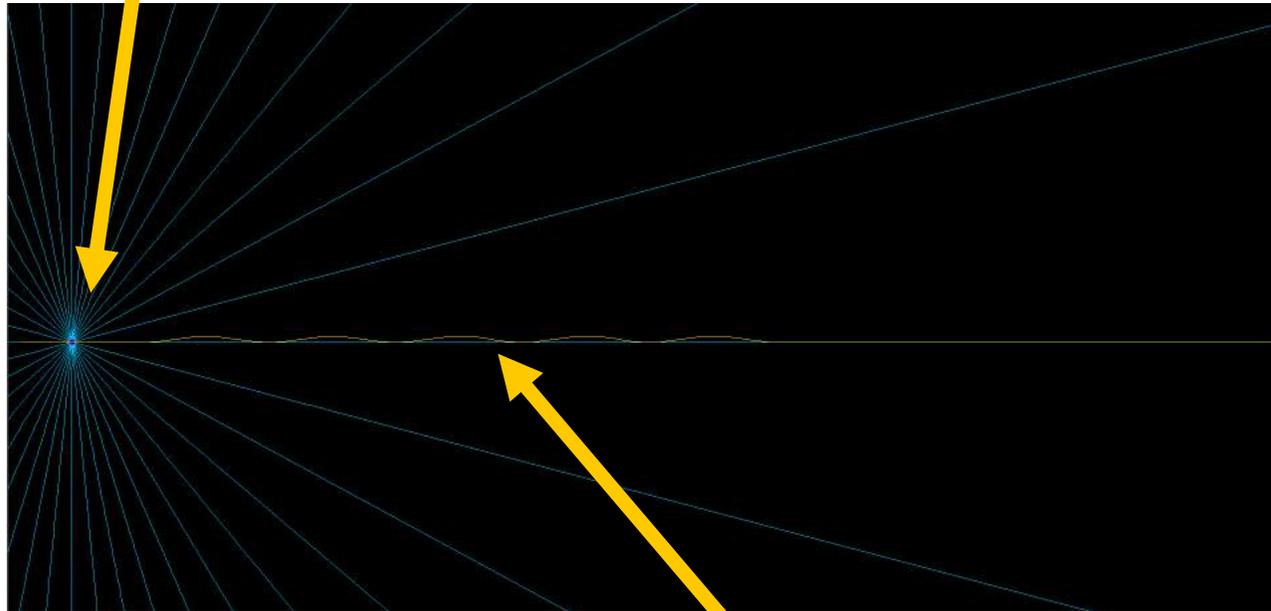
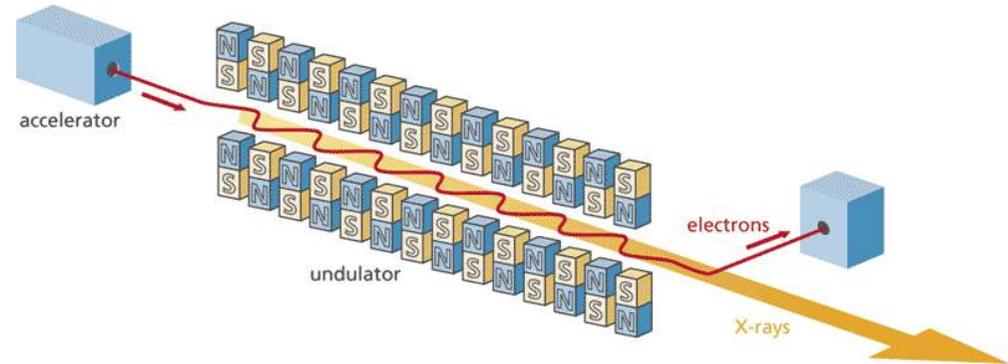


Onda piana



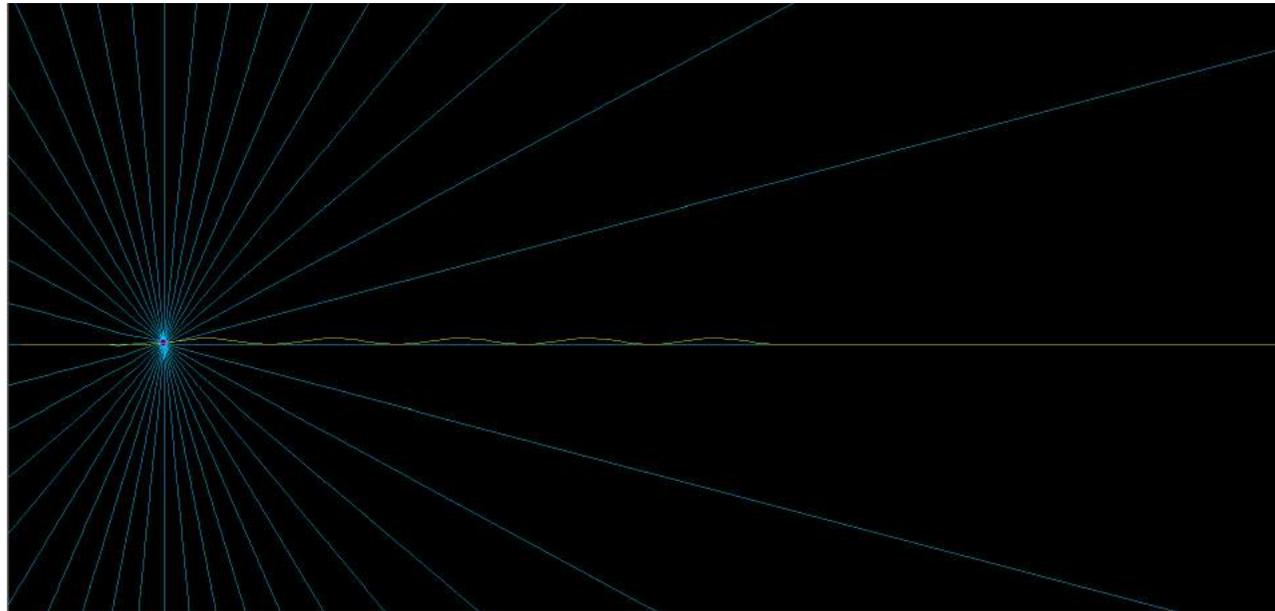
# RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: ONDULATORE

Carica in movimento

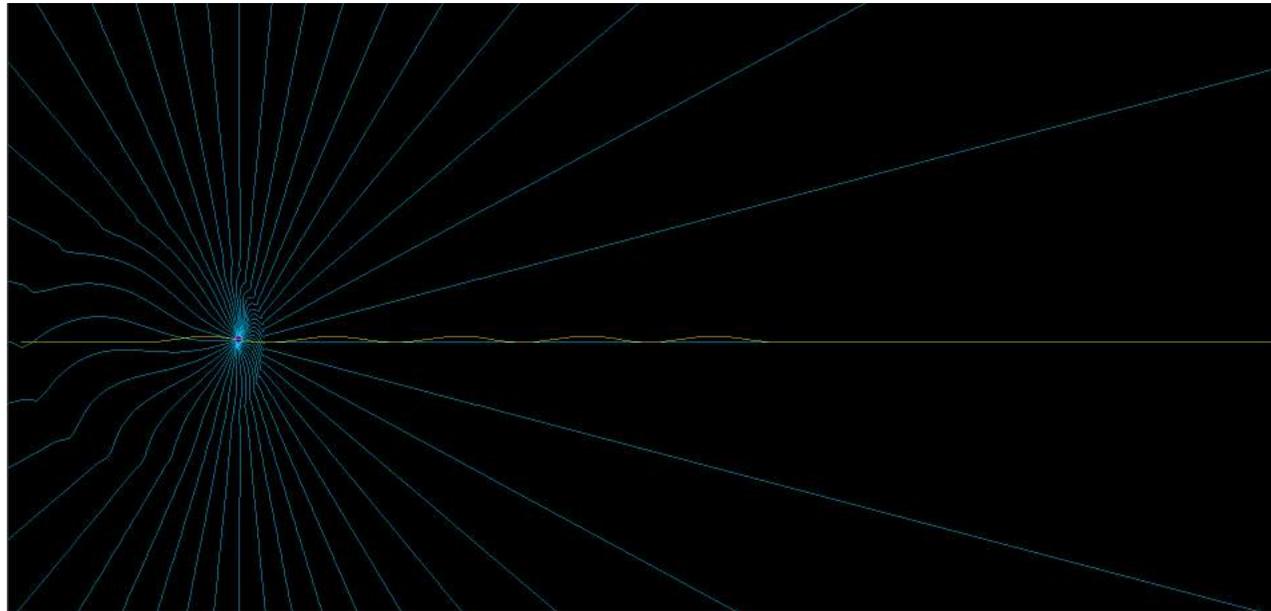


Traiettoria in un  
ondulatore

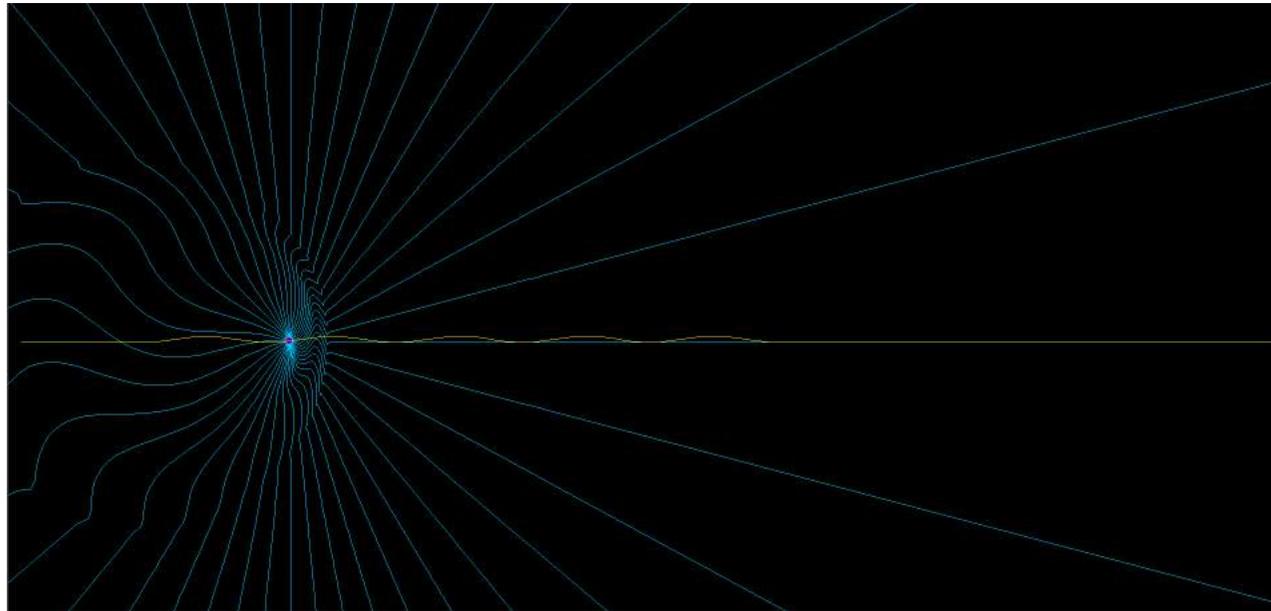
# RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: ONDULATORE



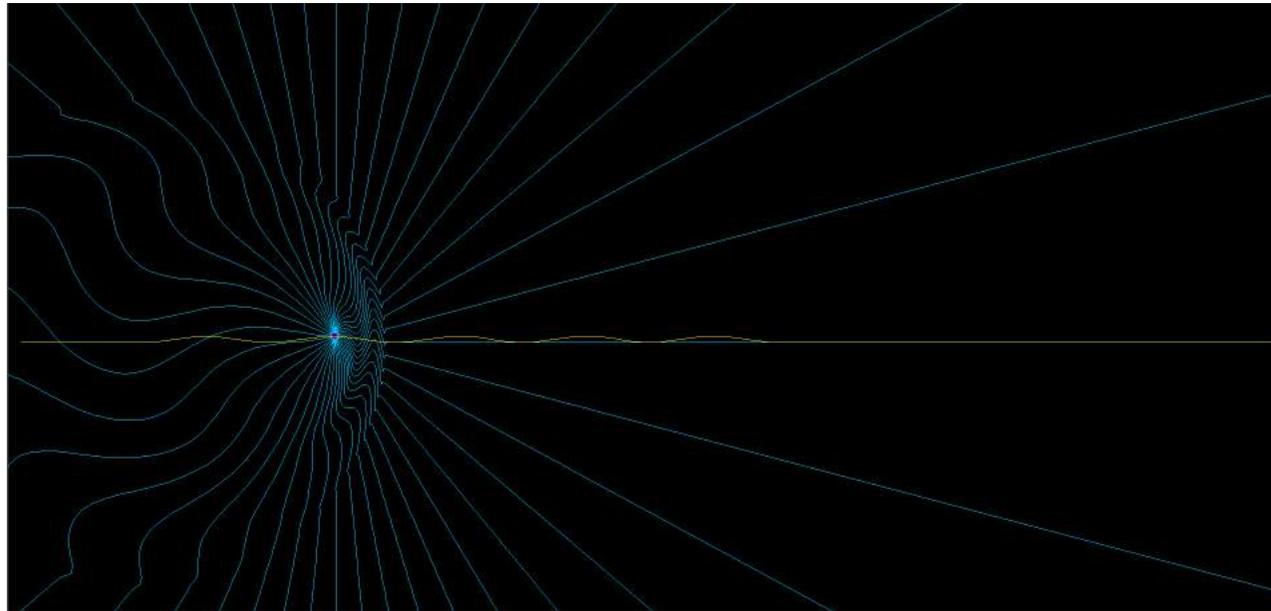
# RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: ONDULATORE



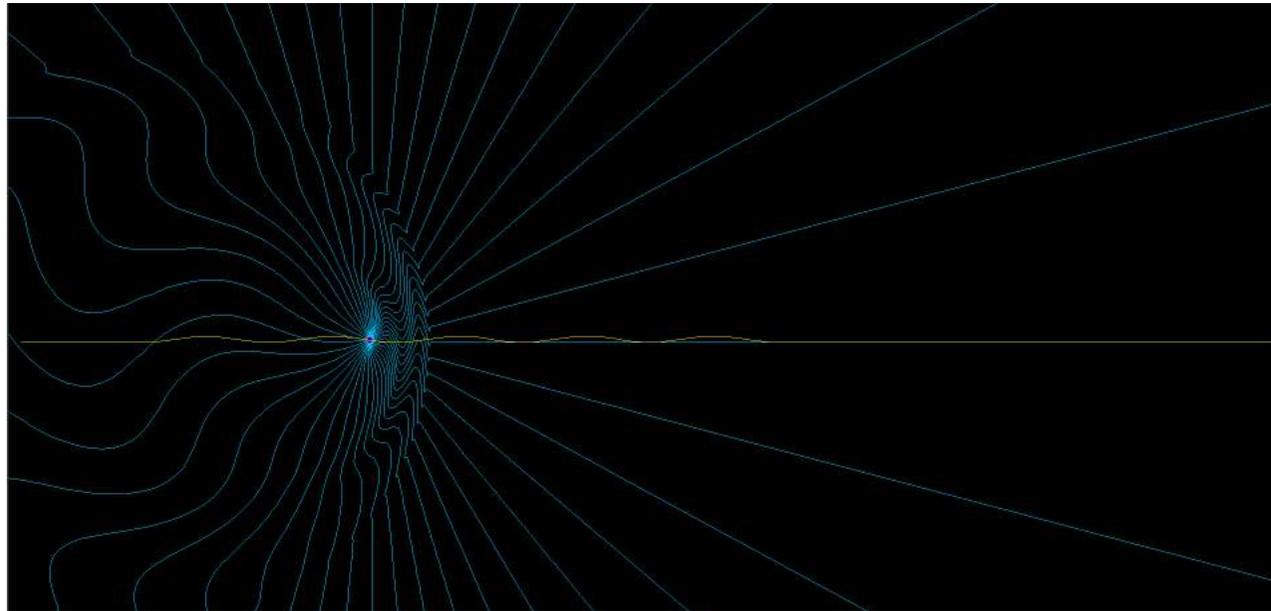
# RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: ONDULATORE



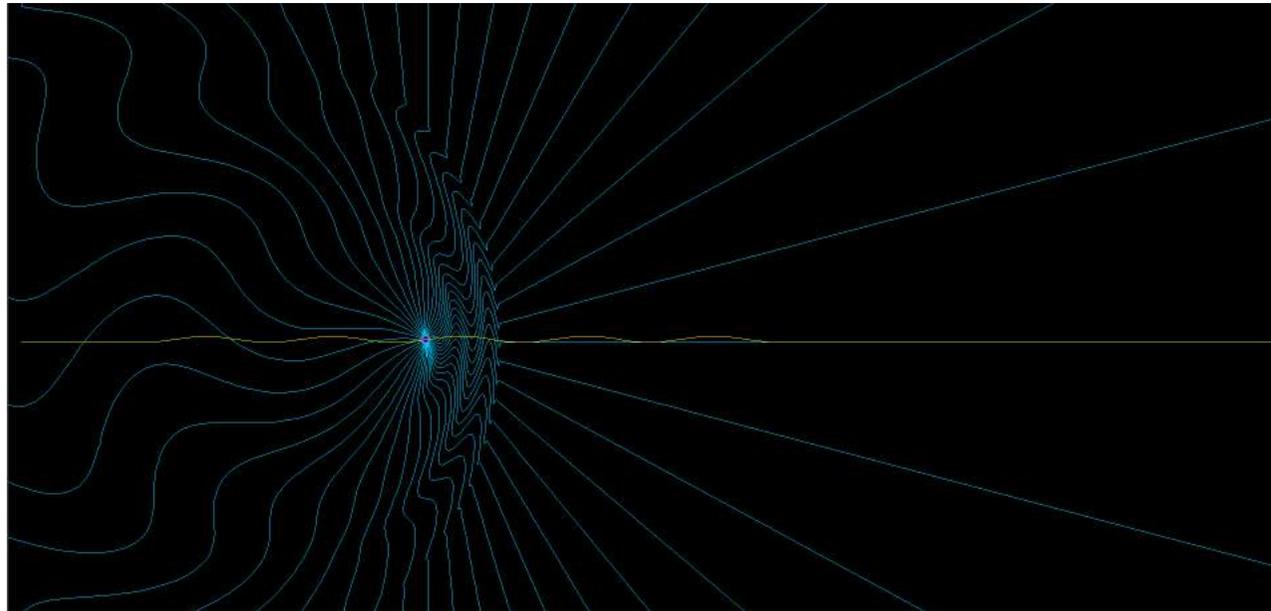
# RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: ONDULATORE



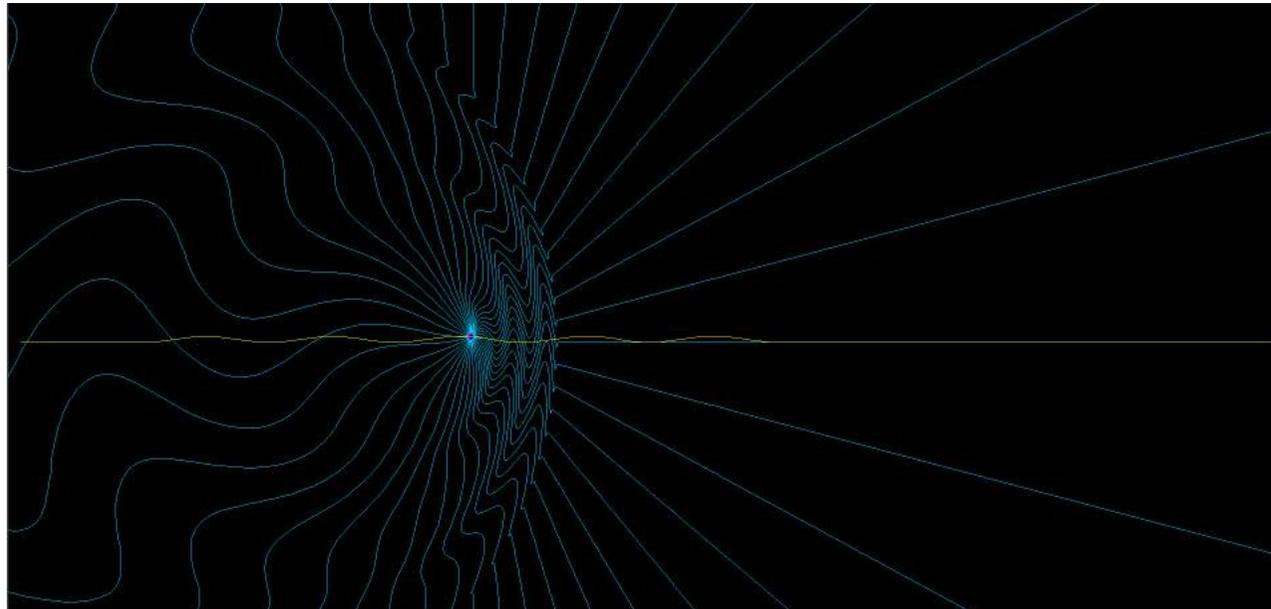
# RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: ONDULATORE



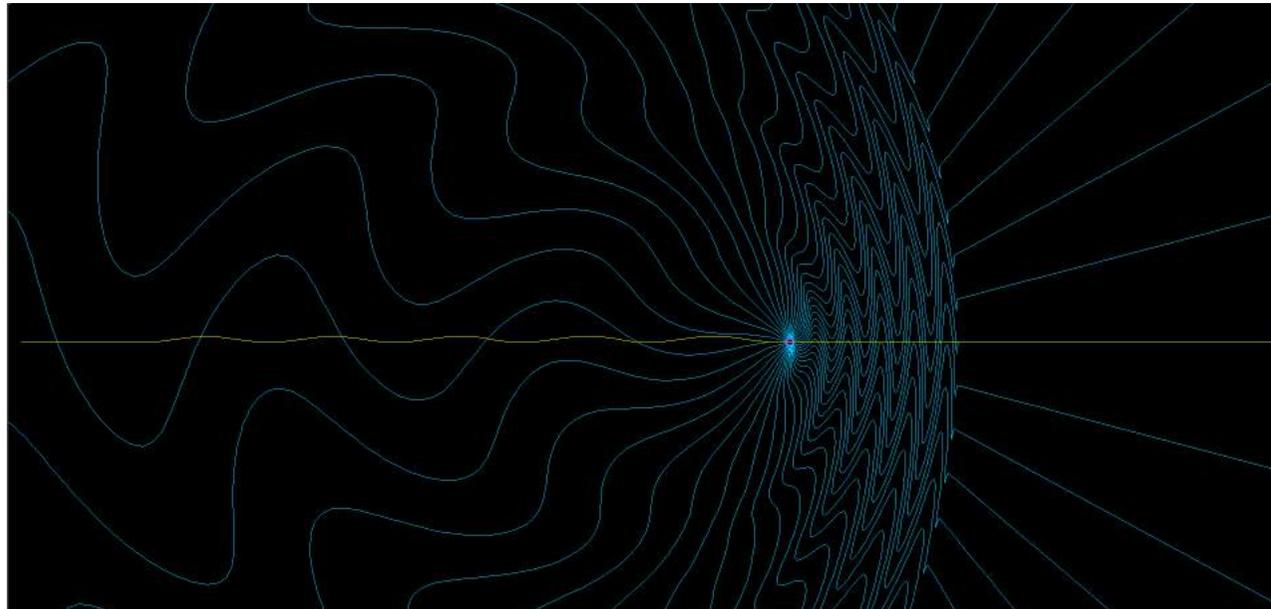
# RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: ONDULATORE



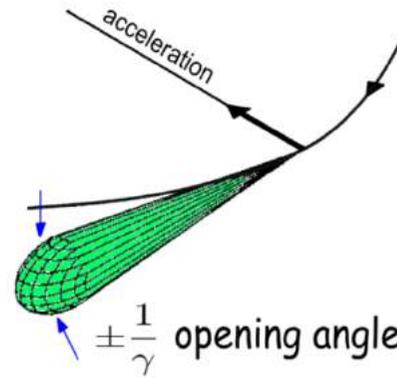
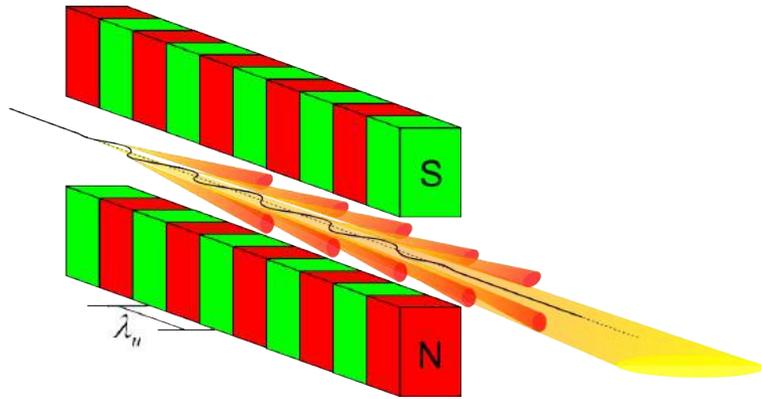
# RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: ONDULATORE



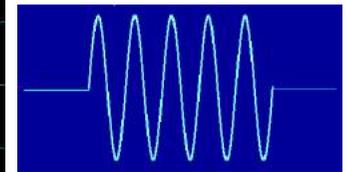
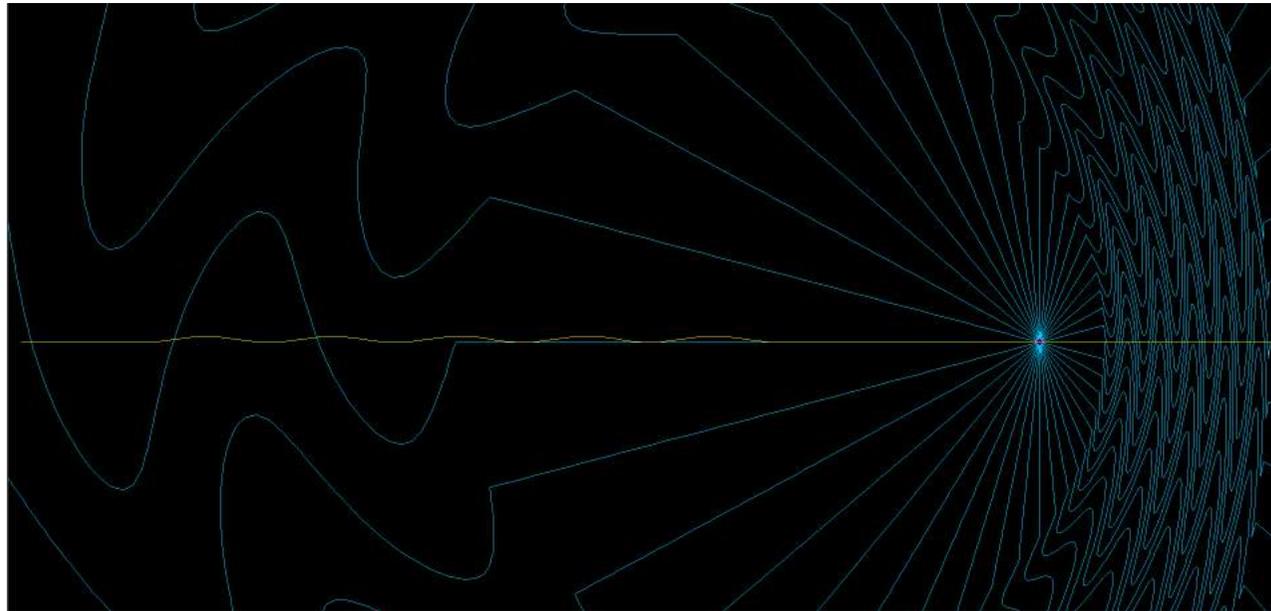
# RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: ONDULATORE



# RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: ONDULATORE

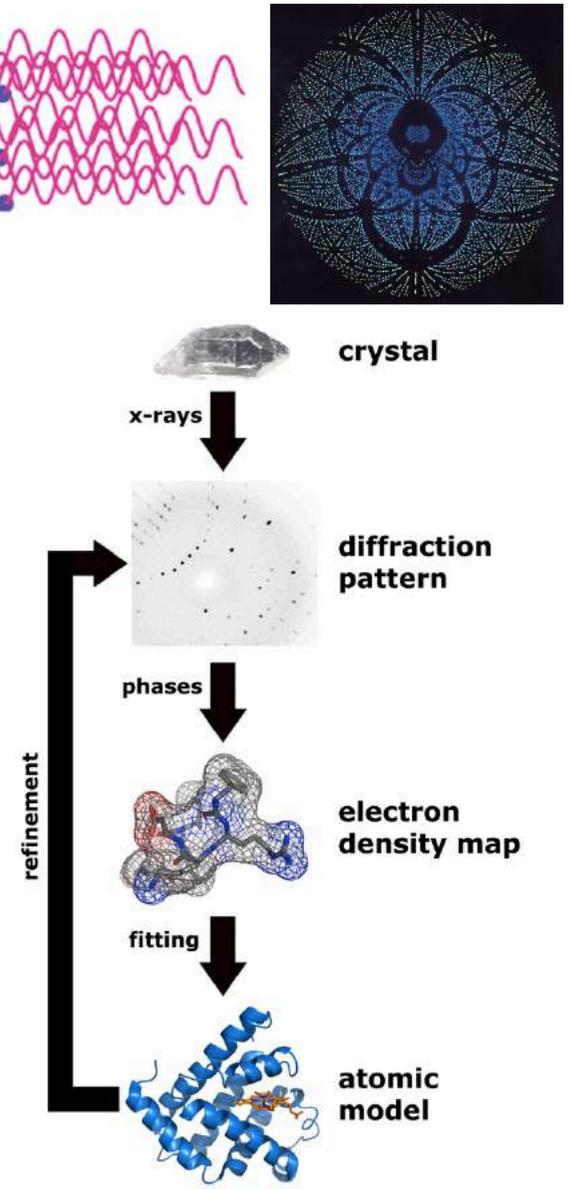
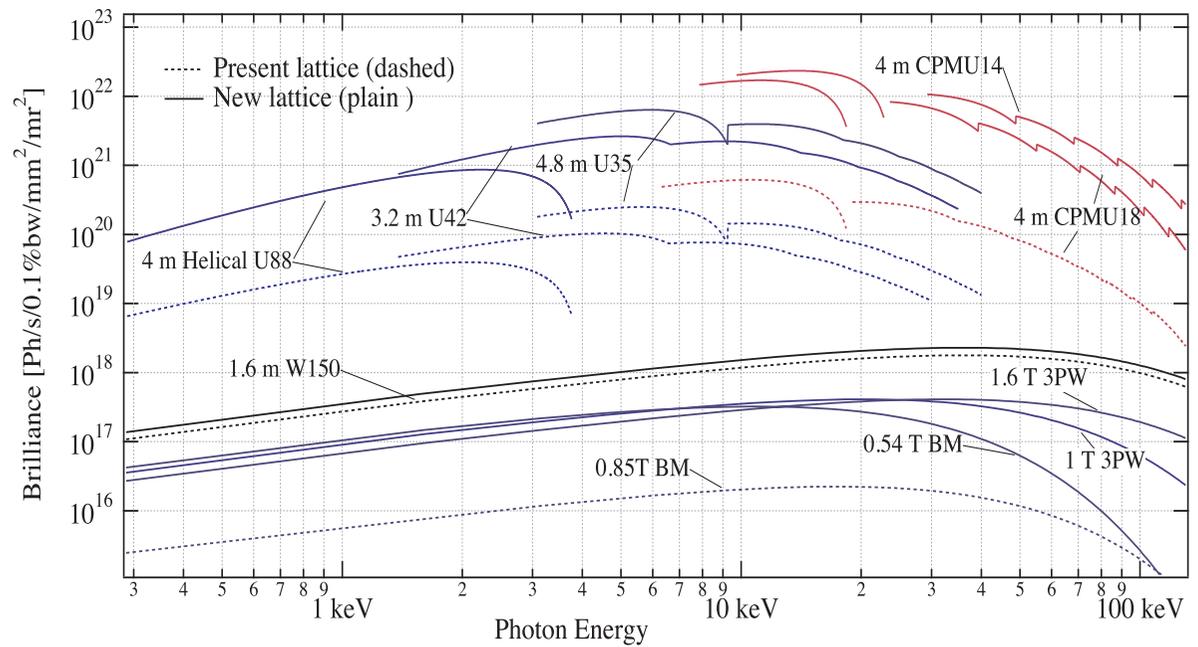
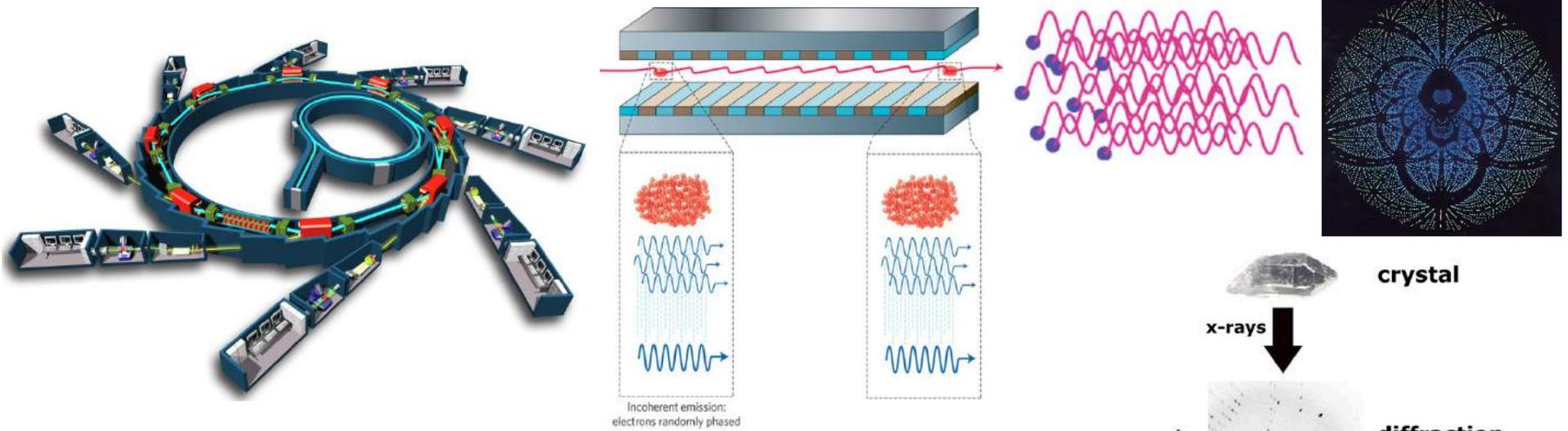


$$L_{pulse} = N_u \lambda_{rad}$$



# PROPRIETA' DELLA RADIAZIONE DI SINCROTRONE

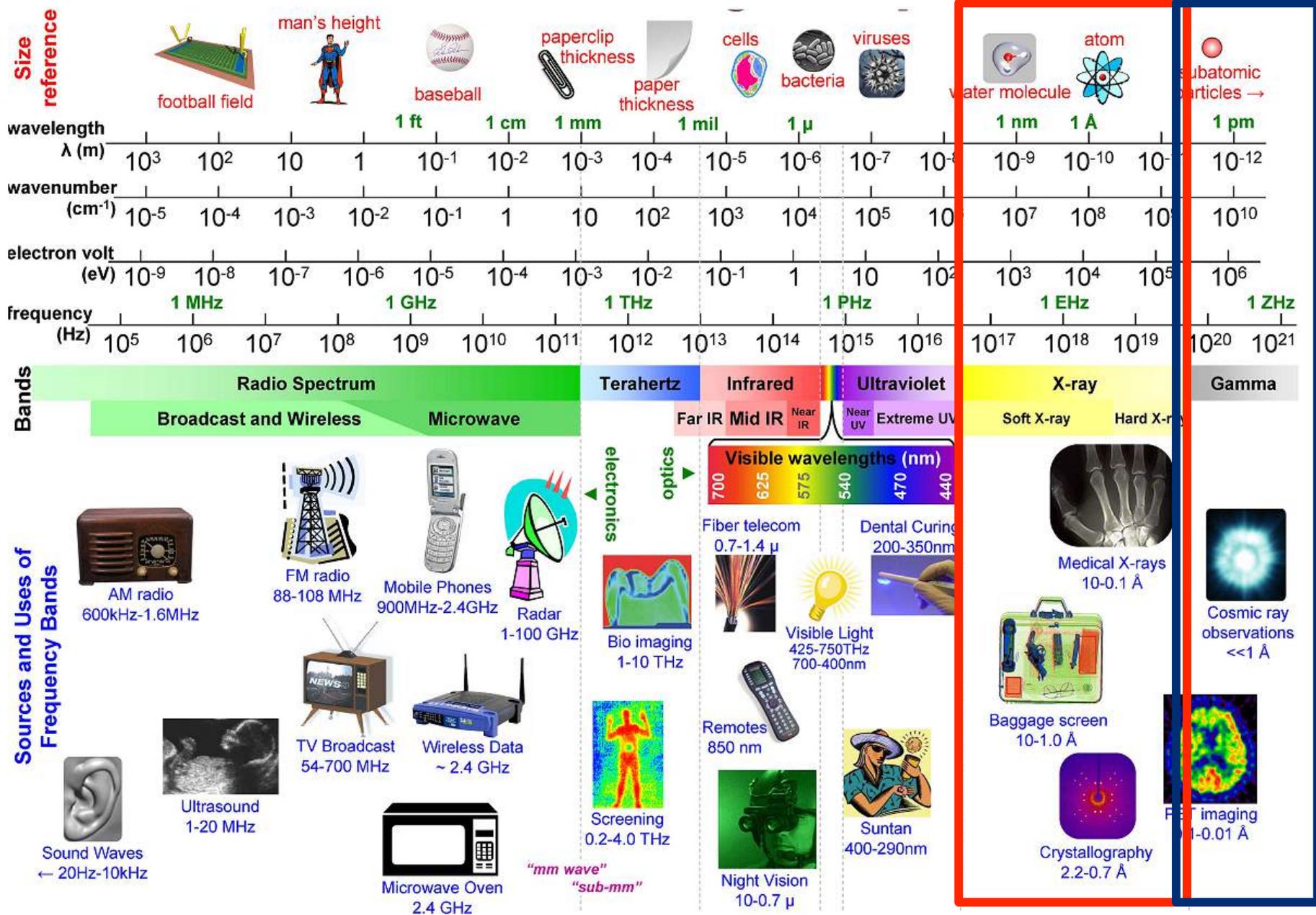
La radiazione di sincrotrone viene emessa in un **ampio spettro**. La lunghezza d'onda critica identifica il **picco dello spettro** ed è funzione dell'energia degli elettroni ( $\gamma^3$ ).



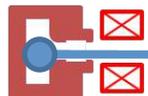
# SINCROTRONI DEDICATI ALLA “PRODUZIONE” DI LUCE



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



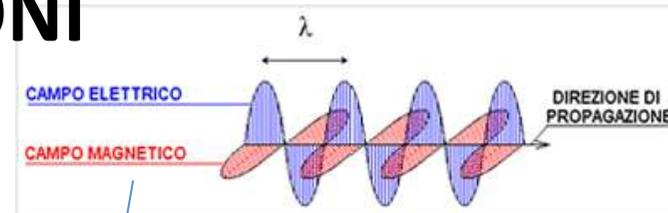
# SORGENTI DI RAGGI X E $\gamma$ BASATE SU COLLISIONI ELETTRONI-FOTONI



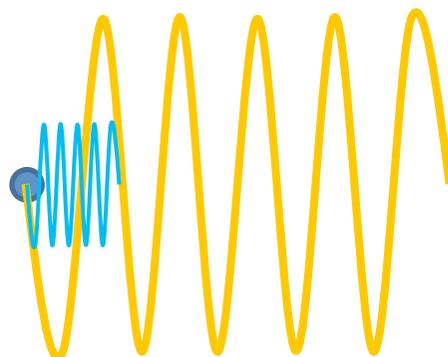
Sorgente di elettroni



LINAC (100-800 MeV)



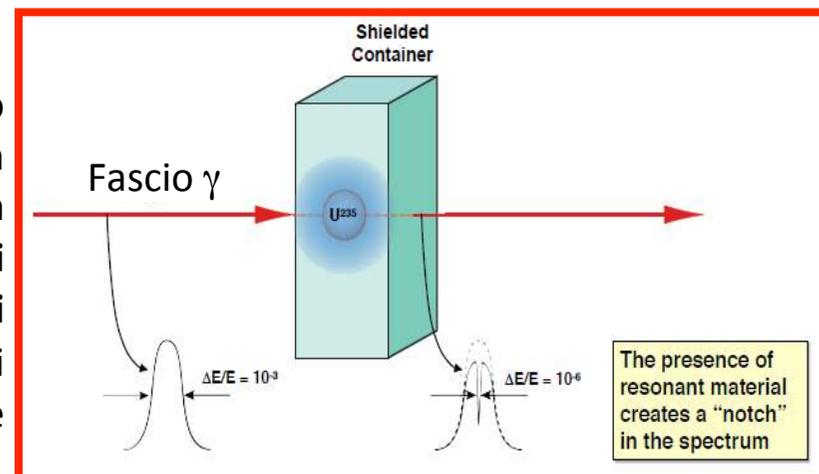
LASER



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



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



# ACCELERATORI PER SORGENTI DI NEUTRONI

**The Nobel Prize in Physics 1994**

*Neutrons behave like particles and waves*

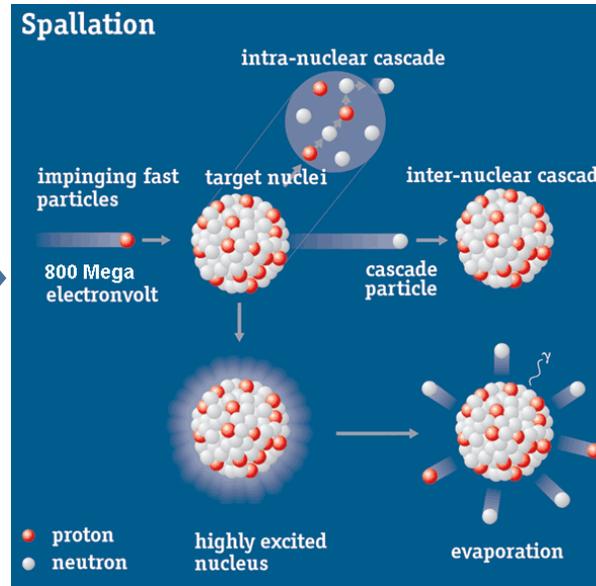
The Royal Swedish Academy of Sciences has awarded the 1994 Nobel Prize in Physics for pioneering contributions to the development of neutron scattering techniques for studies of condensed matter.

**Neutrons reveal structure and dynamics**

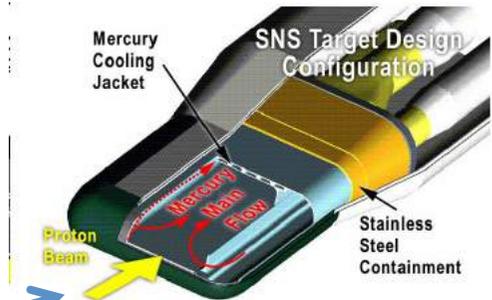
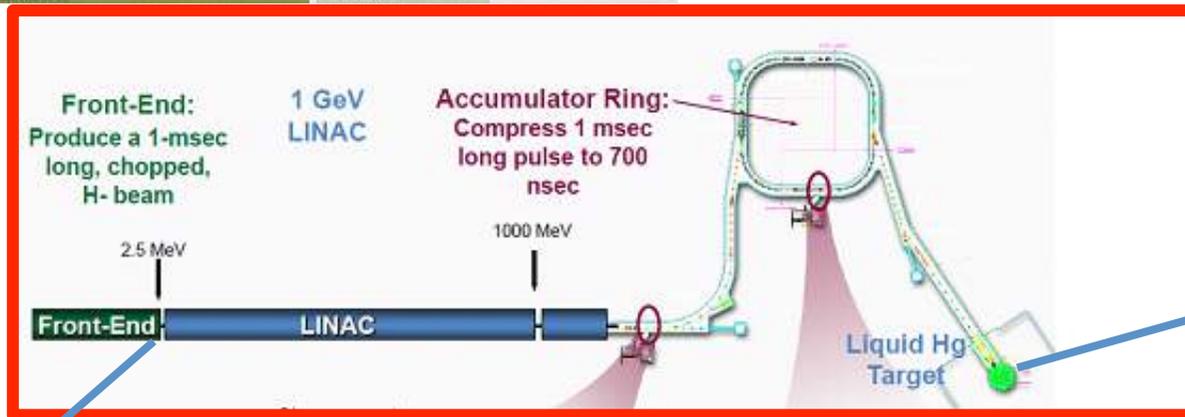
Neutrons show where atoms are. Neutrons show what atoms do.

Small nuclei use of atoms... Neutrons source against atomic nuclei... Neutrons show where atoms are... Neutrons show what atoms do... Research reactor... Neutrons reveal laser stresses... Neutrons show what stress reveals...

Further reading: [http://www.nobelprize.org/nobelprizes/physics/laureates/1994/](#)



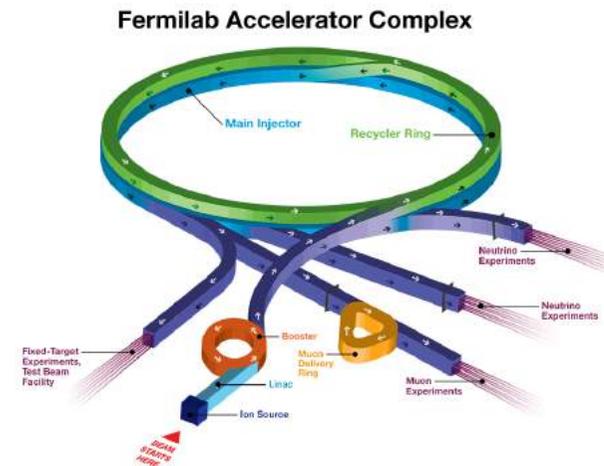
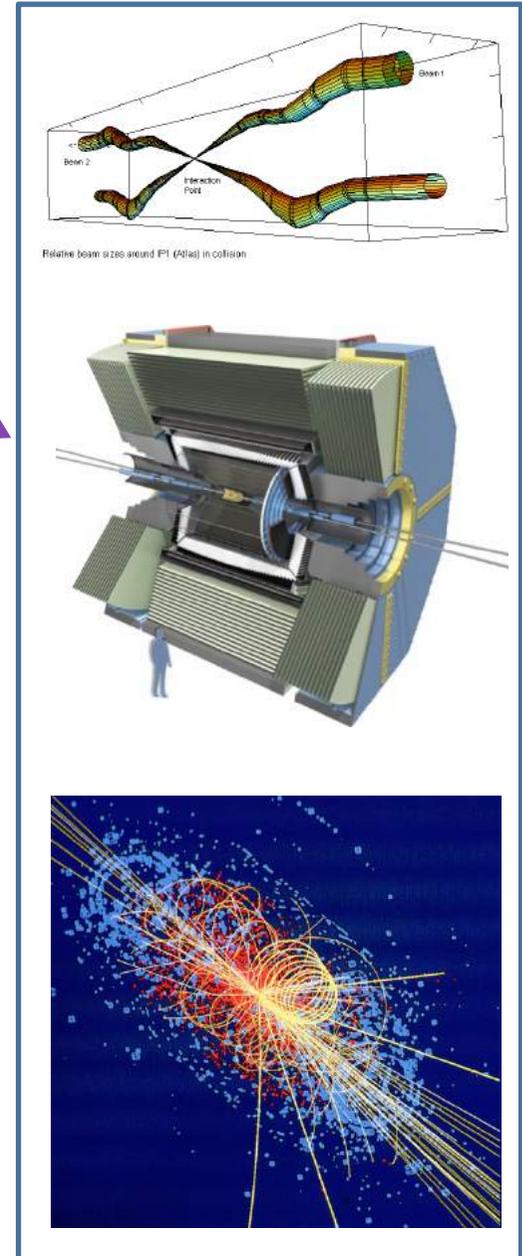
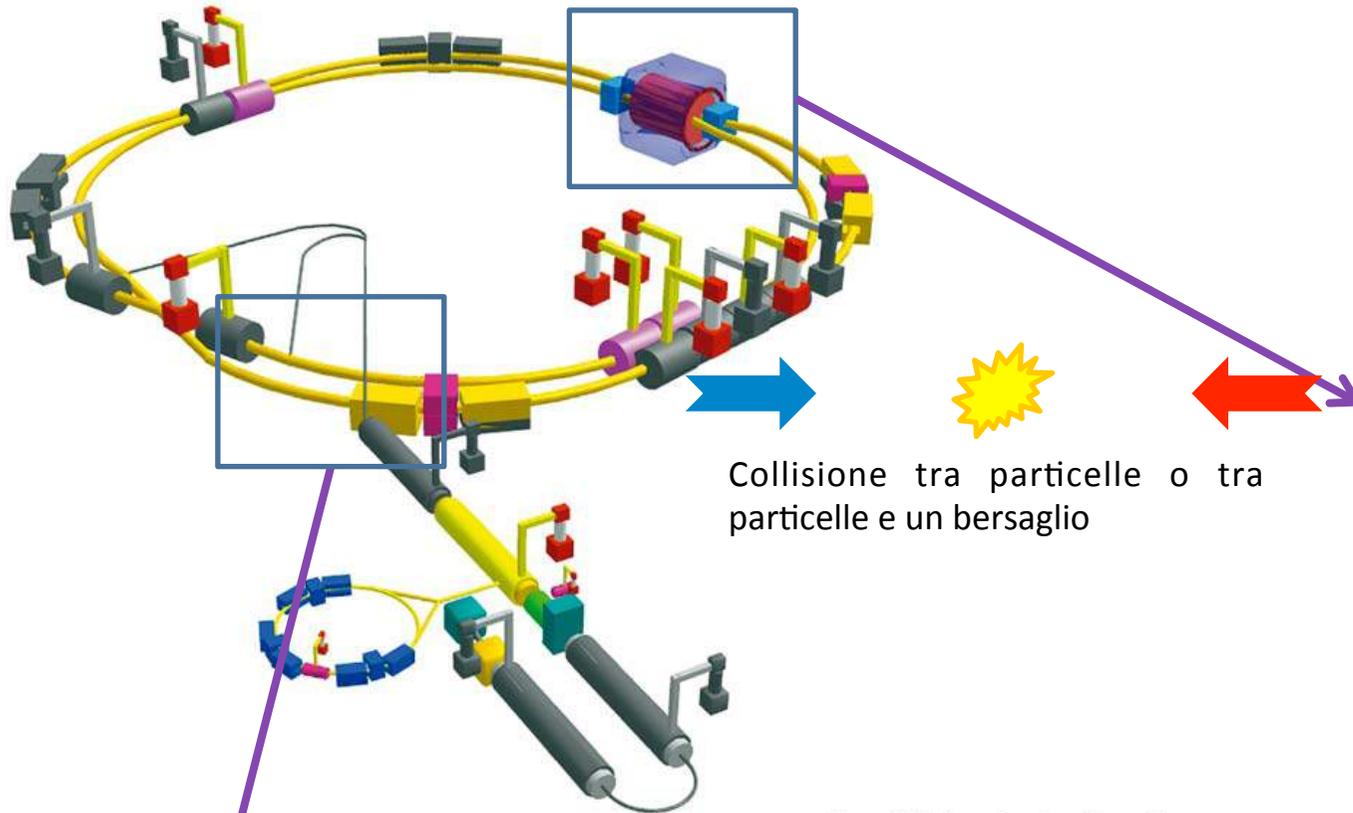
spallazione



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



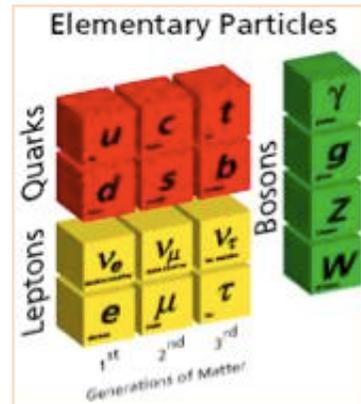
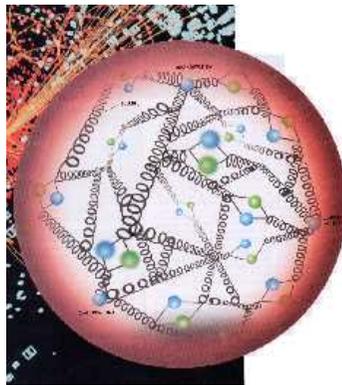
# FISICA FONDAMENTALE: COLLISORI (COLLIDERS)



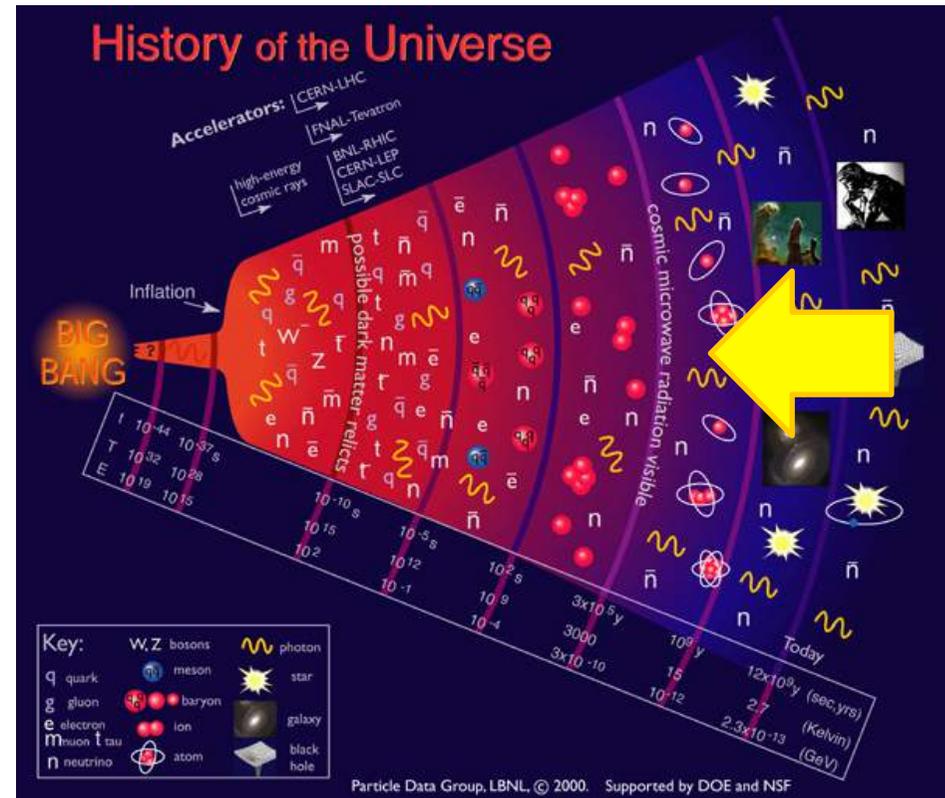
# ACCELERATORI DI PARTICELLE: MICROSCOPI SUB-ATOMICI E MACCHINE DEL TEMPO

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

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



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



# COLLISIONI: ENERGIA O DENSITA' DI ENERGIA?

L' eV rappresenta un'energia molto piccola

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

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

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

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



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

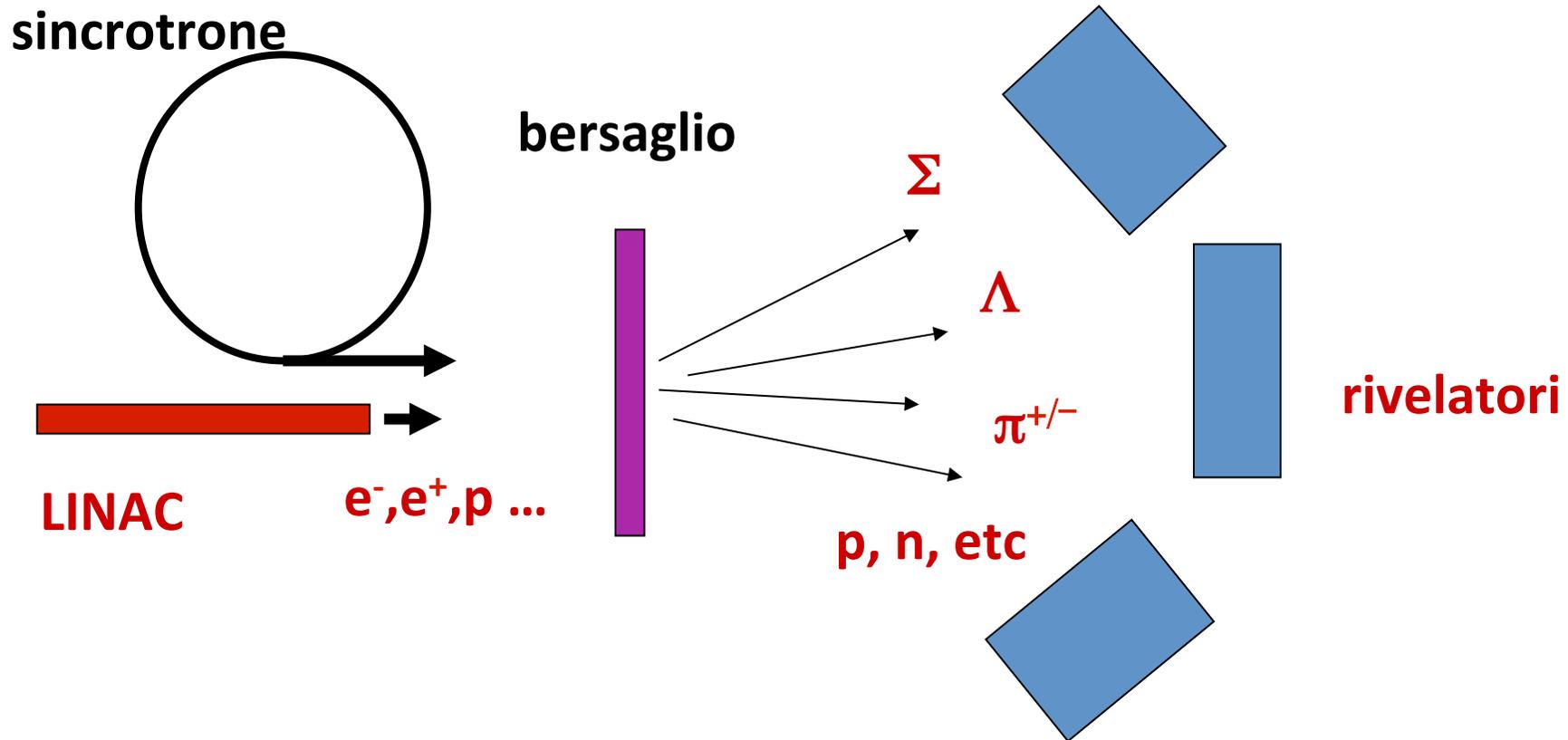


In un *acceleratore come LHC* si raggiungono energie per ogni protone di 7 TeV ( $7 \times 10^{12} \text{ eV}$ )!

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

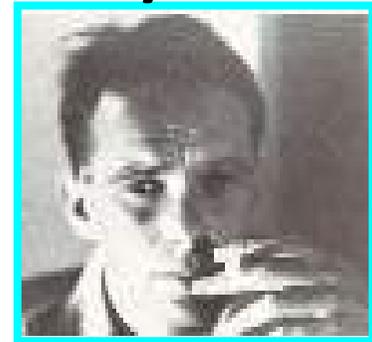


# Fisica delle Particelle con Acceleratori: collisioni su targhetta fissa

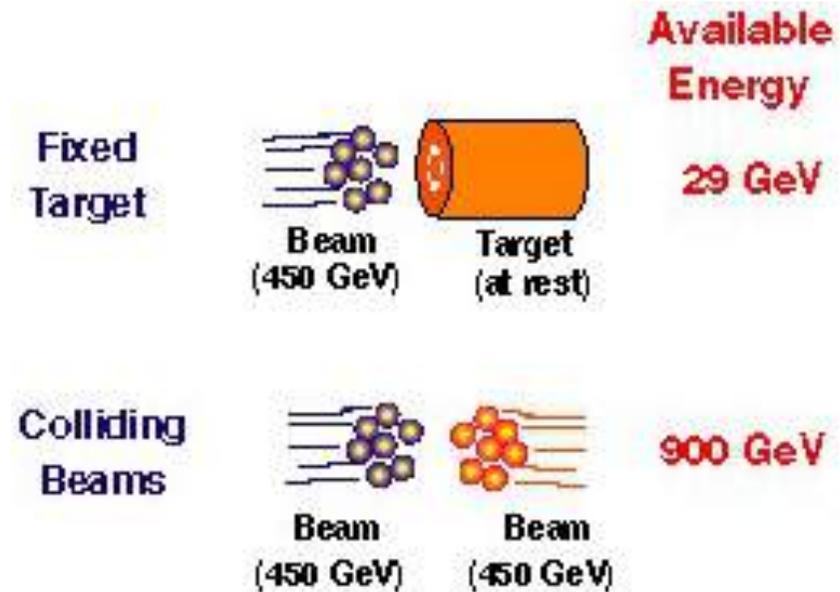
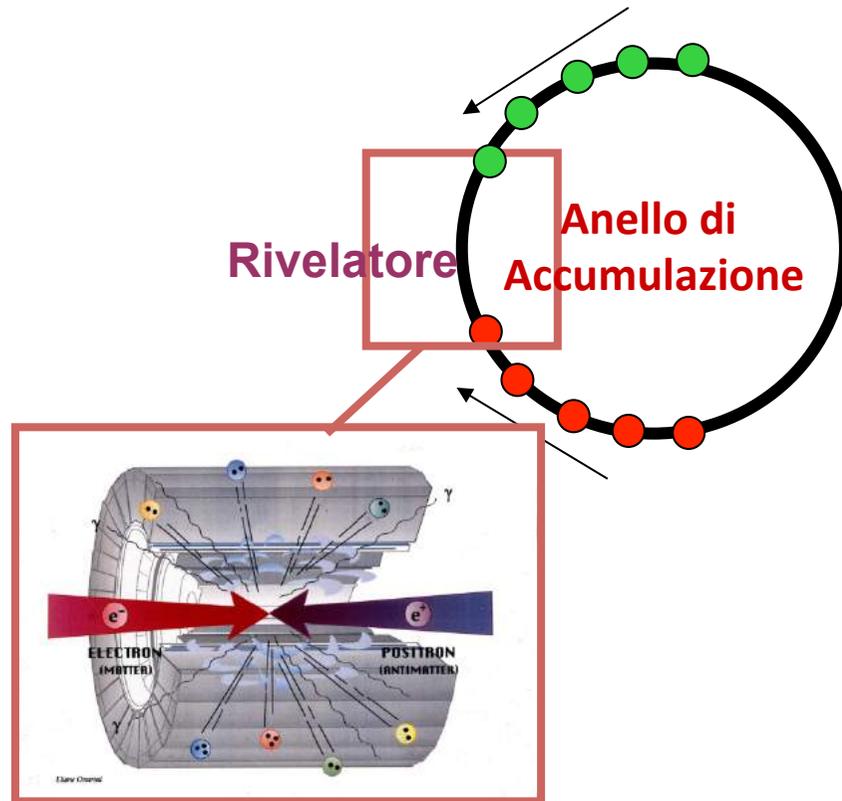


- 1) La materia è **vuota** : ciò che non ha interagito viene perduto;
- 2) Il bersaglio è **complesso**: molte delle particelle prodotte disturbano l'esperimento;
- 3) Rivelatore "**anisotropo**";
- 4) Parte dell'energia del fascio di particelle **non viene "sfruttata"** nell'interazione in quanto posseduta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

# Nascita dei Moderni Collider (Collisori)

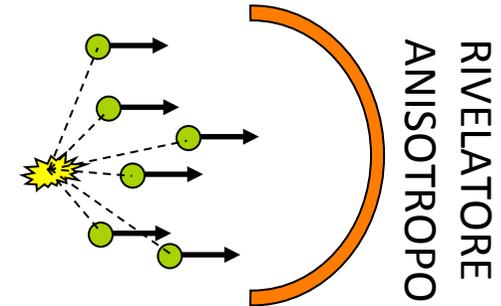
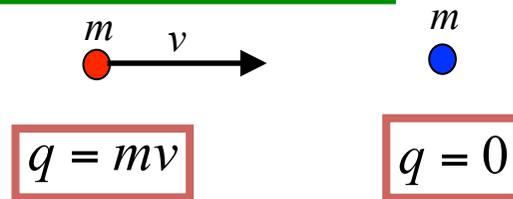


La geniale idea di **Bruno Touschek** (1960) fu quella di utilizzare come particelle collidenti, **particelle ed antiparticelle** che, nella loro annichilazione, avrebbero rilasciato **tutta la loro energia** per creare nuove particelle. Inoltre i **prodotti delle collisioni sarebbero stati relativamente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



# Energia Disponibile nell'interazione

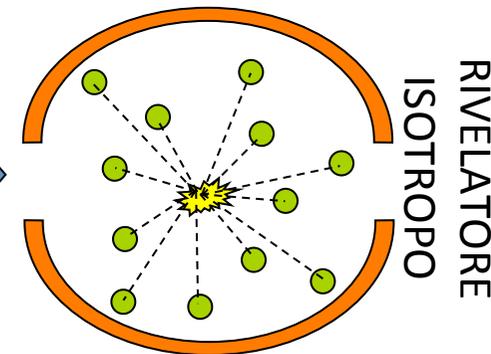
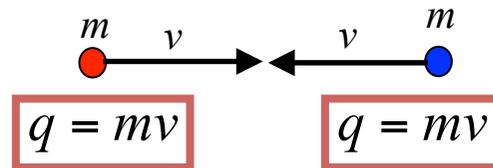
## COLLISIONE CONTRO BERSAGLIO FISSO



ENERGIA DISPONIBILE  
NELL'INTERAZIONE

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

## COLLISIONE FASCIO-FASCIO



ENERGIA DISPONIBILE  
NELL'INTERAZIONE

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

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

# AdA (Anello di Accumulazione) 1960-1965

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



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

IL NUOVO CIMENTO

The Frascati Storage Ring.

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

R. TOSCHEK

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

(ricevuto il 7 Novembre 1960)

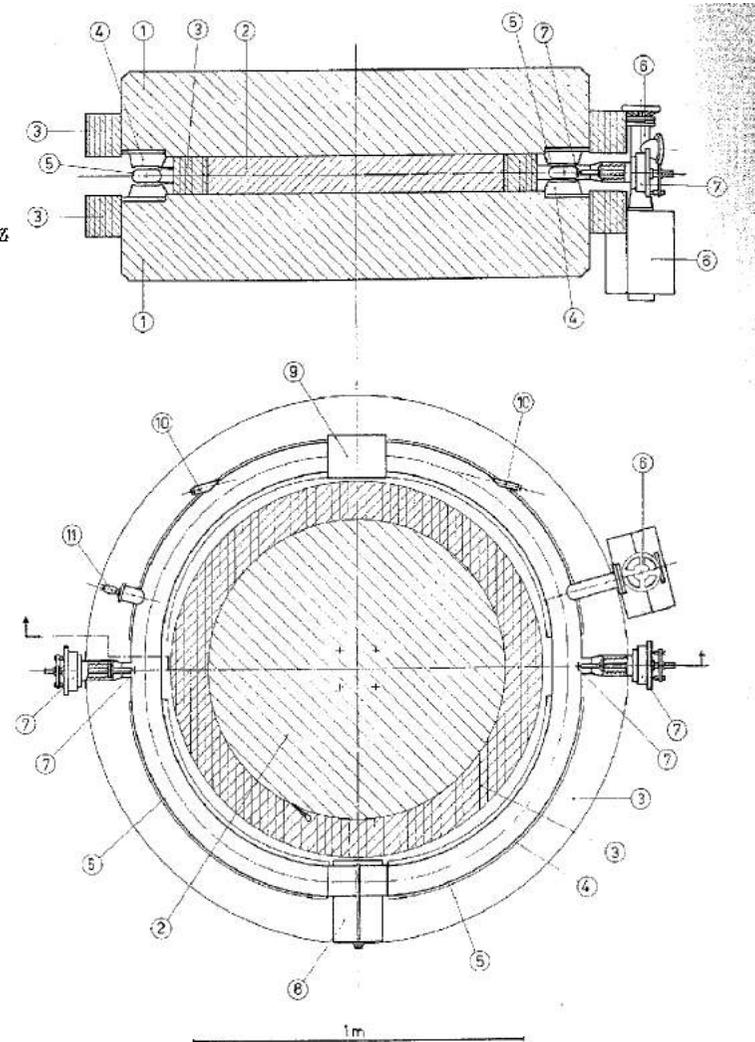
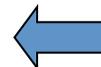
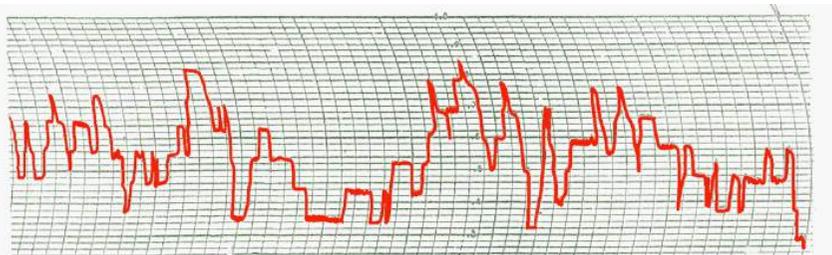


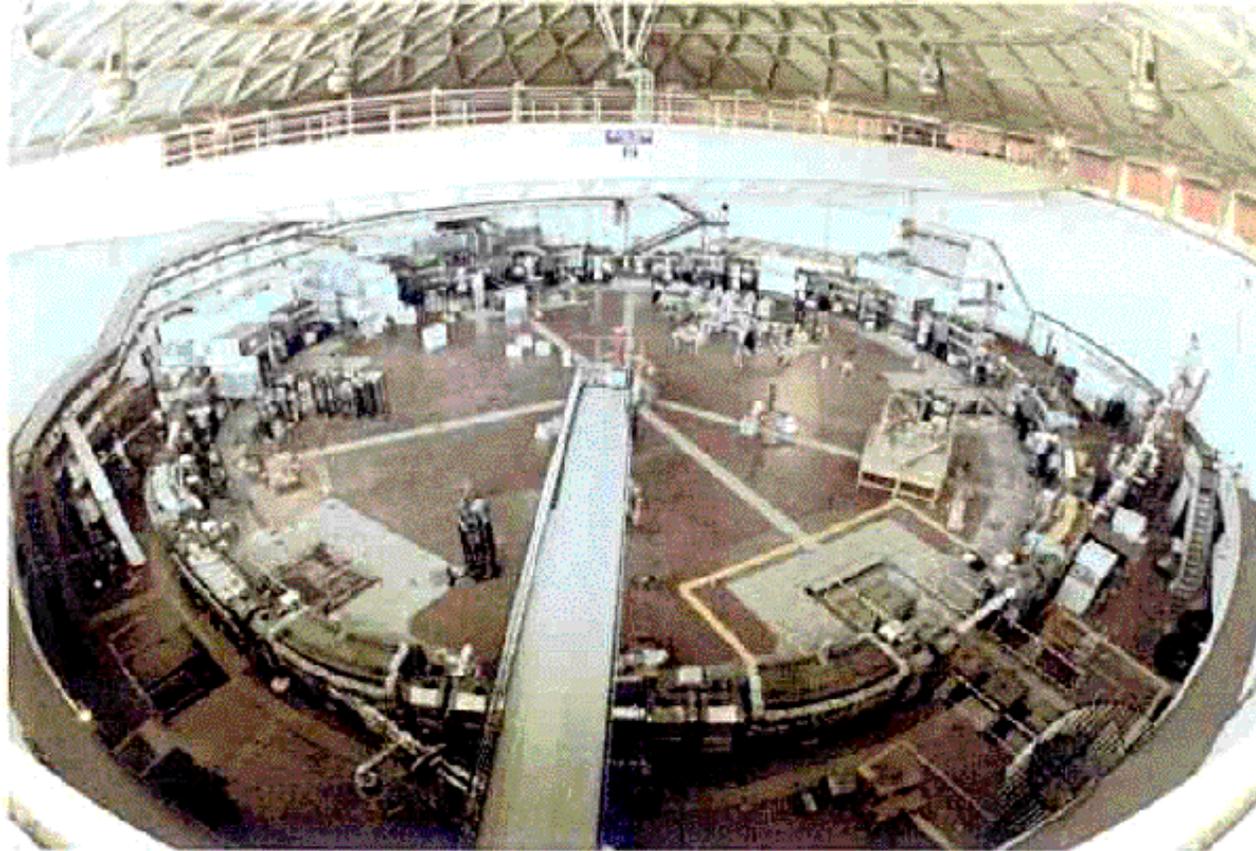
Fig. 1. - Elevation and plan section of the Frascati Storage Ring (anello di accumulazione - AdA): 1) magnet yoke; 2) magnet core; 3) coils; 4) polepieces; 5) doughnut; 6) titanium pump; 7) injection ports; 8) RF cavity; 9) experimental section; 10) windows for the observation of the synchrotron radiation;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

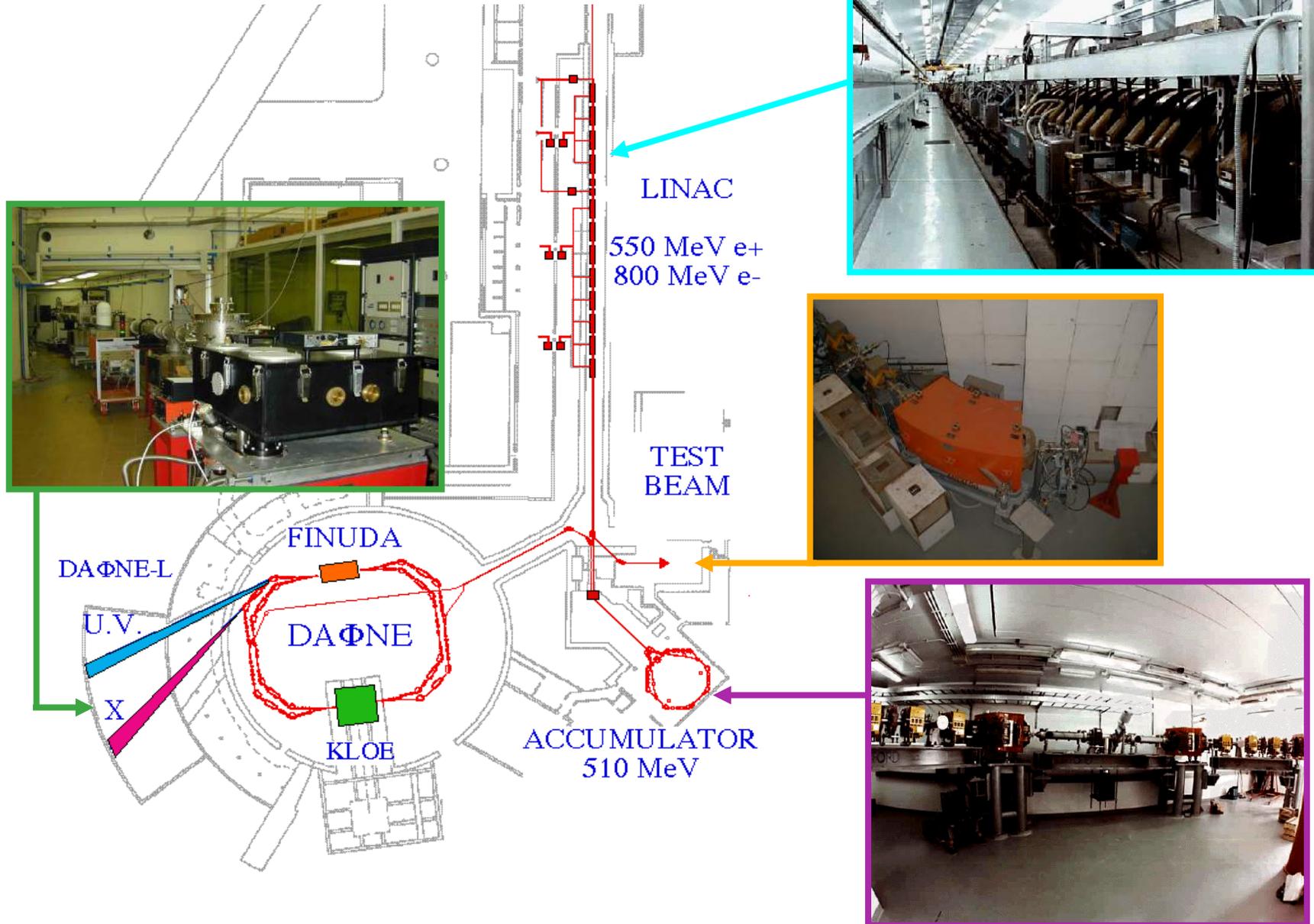


La **costruzione della nuova macchina iniziò nel 1963** e il primo elettrone fu immagazzinato nel 1967. Un LINAC di 350 MeV fu utilizzato come iniettore. La corrente massima circolante in ADONE era di **100 mA in 3 pacchetti**.

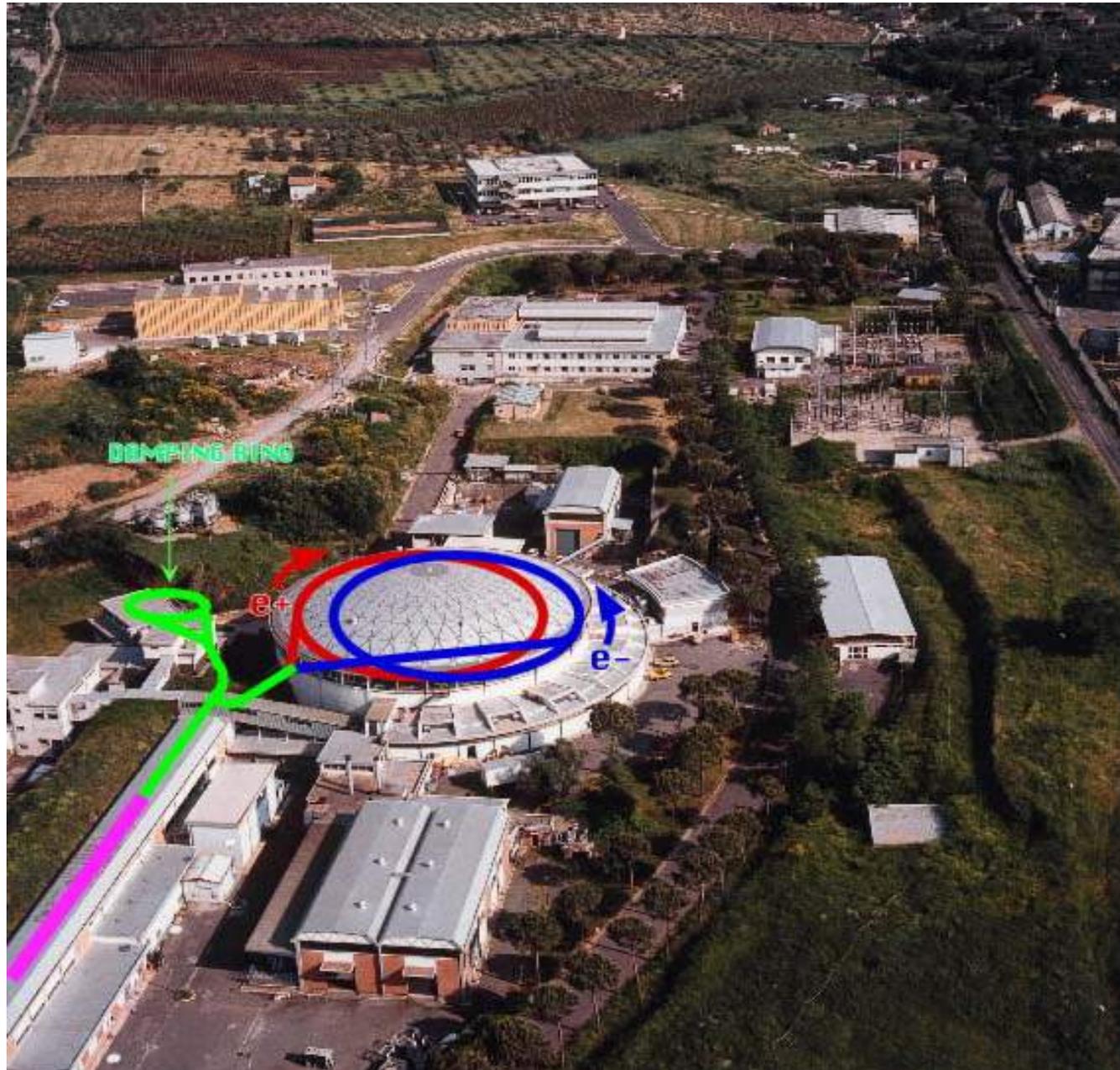
Si raggiunse la luminosità di progetto:  $3 \times 10^{29} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ .

ADONE fu spento il 26 Aprile 1993.

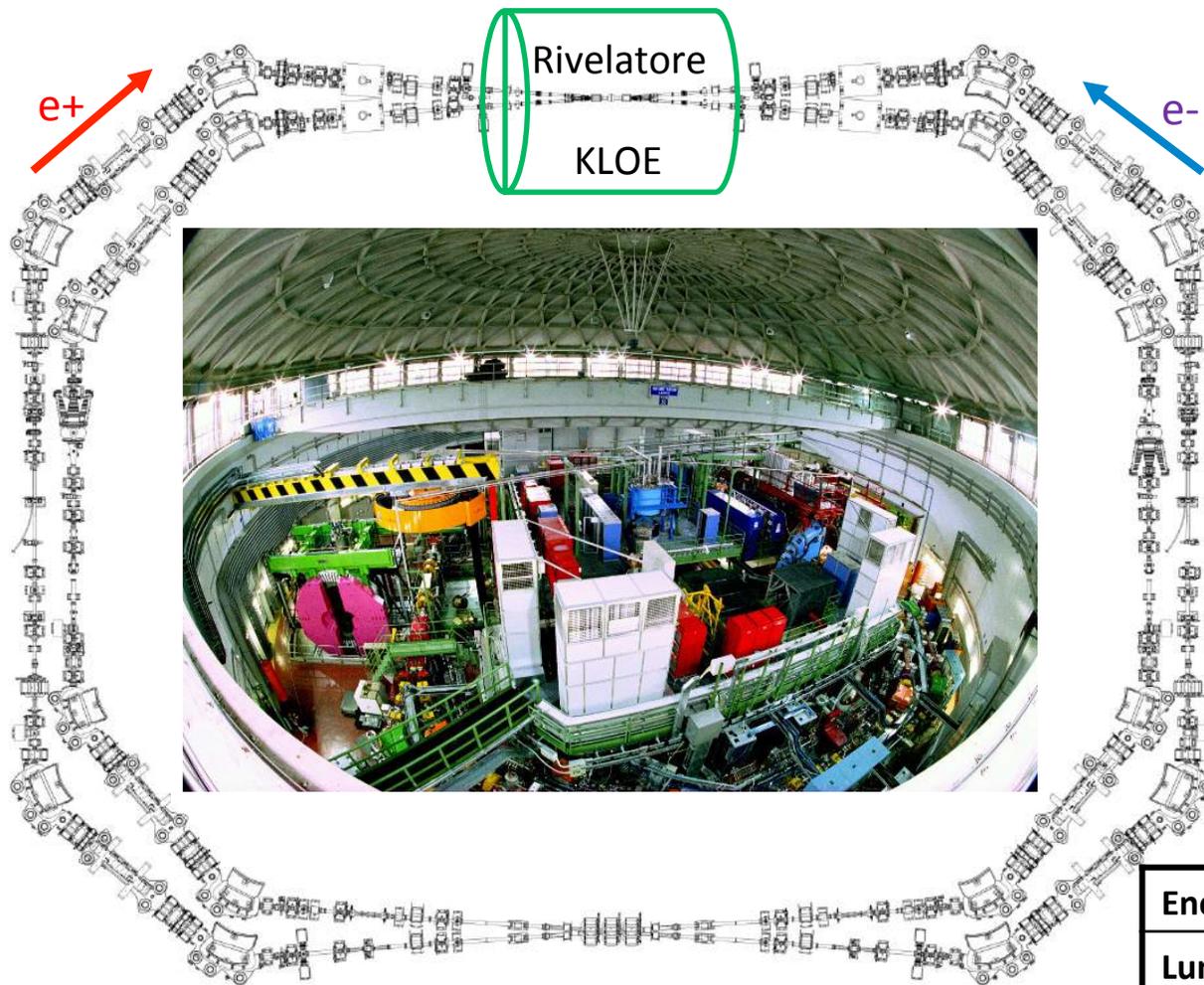
# La $\Phi$ -Factory a Frascati: DAΦNE



# La $\Phi$ -Factory a Frascati



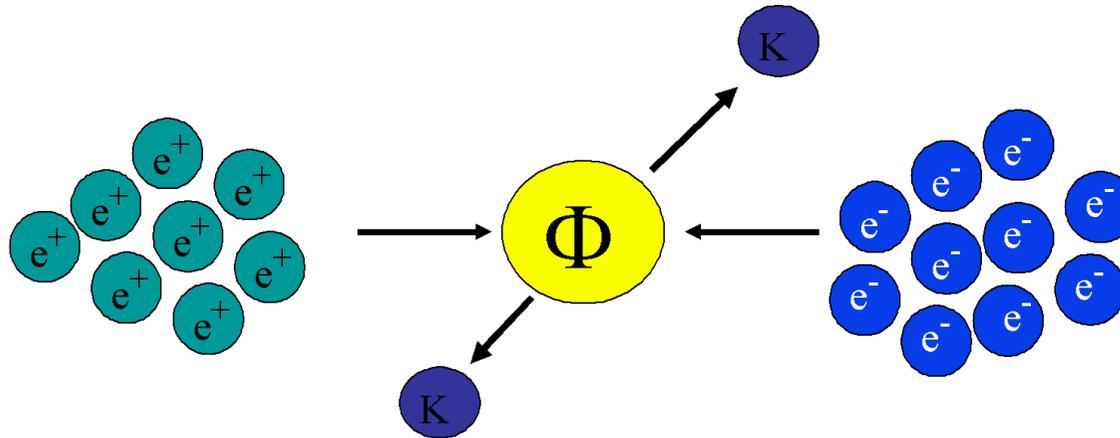
# Alcuni parametri di DAΦNE



<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**

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

Ecco come appare un evento ipernucleare all'interno del rivelatore

di macchine acceleratrici - Acifrazza 11-15 Giugno 2007

**DEAR**  
(DAΦNE Exotic Atom Research)

**Idrogeno Kaonico**

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

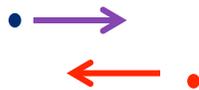
$2p \rightarrow 1s (K_{\alpha})$   
**X ray of interest**

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

# Sezione d'urto e luminosità di un collider

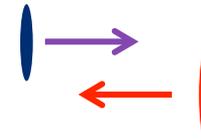
Due particelle ( $e^+/e^-$  a DAΦNE ,ad esempio) che collidono possono produrre *tipi diversi di eventi*, alcuni più probabili di altri. La *sezione d'urto*  $\sigma$  di un determinato evento è *proporzionale alla probabilità che l'evento avvenga* e si misura in  $\text{cm}^2$ .

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



**Evento poco probabile.**

A bassa sezione d'urto



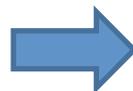
**Evento più probabile.**

Ad elevata sezione d'urto

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

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

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



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

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

# Luminosità di un *collider*

Per fasci gaussiani la luminosità si calcola come:

Numero di particelle per fascio

**La luminosità si aumenta** aumentando:

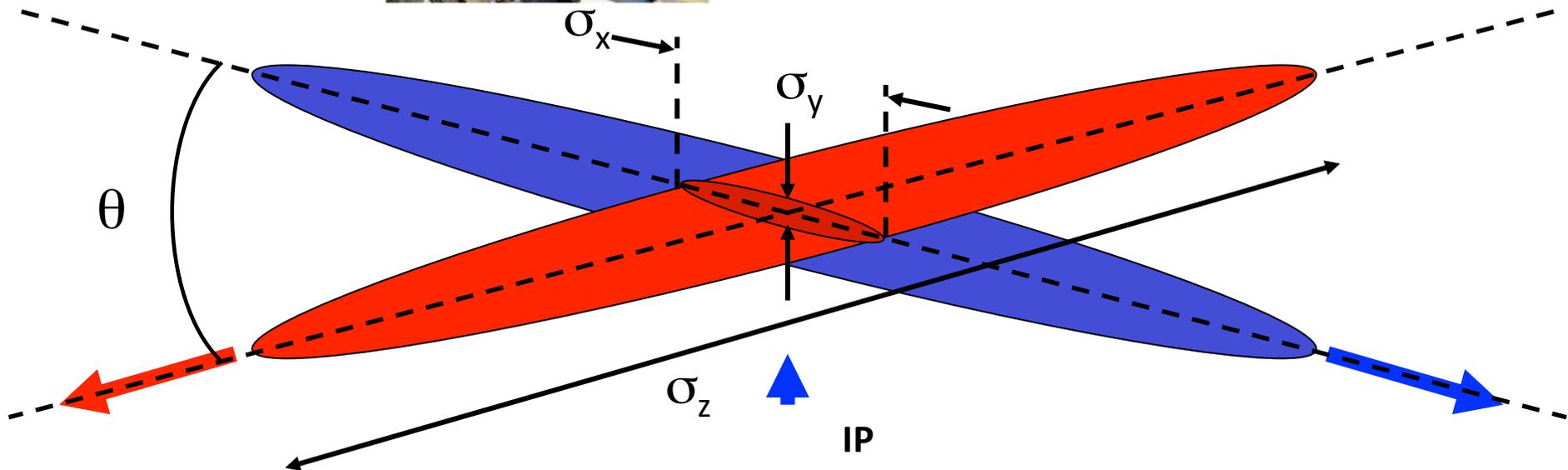
- la densità dei fasci
- frequenza di collisione
- la quantità di particelle collidenti

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

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



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

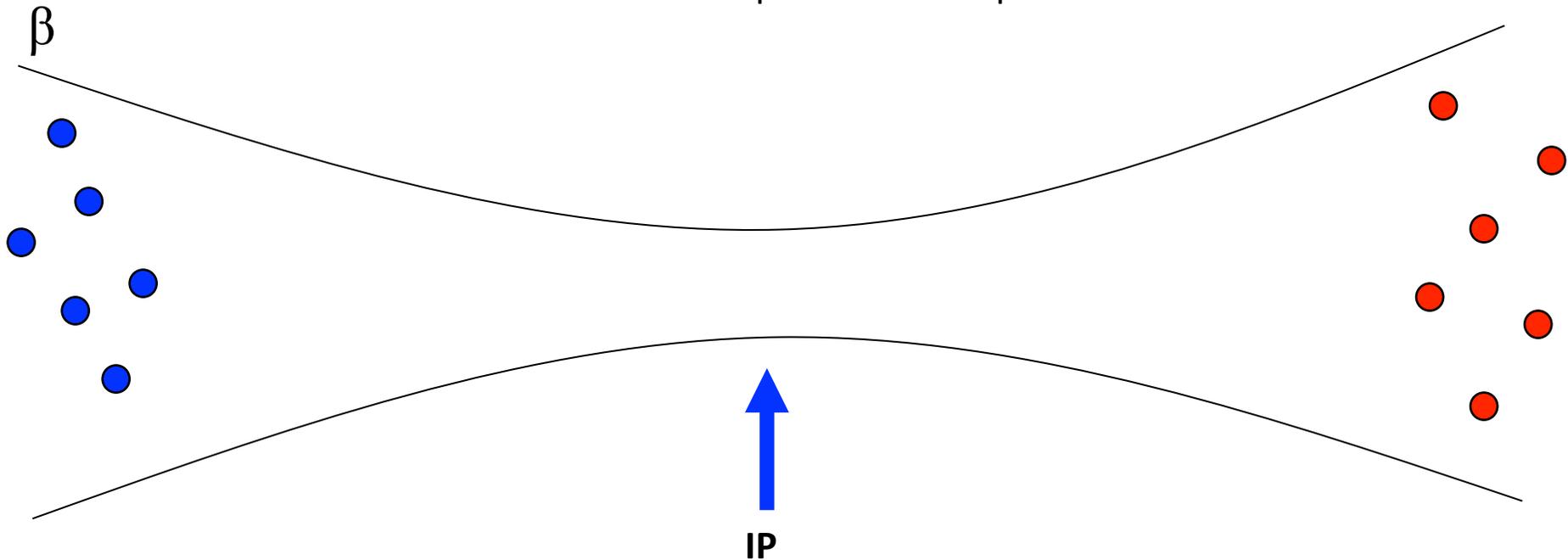


# Luminosità di un *collider*

Numero di particelle per fascio

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

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

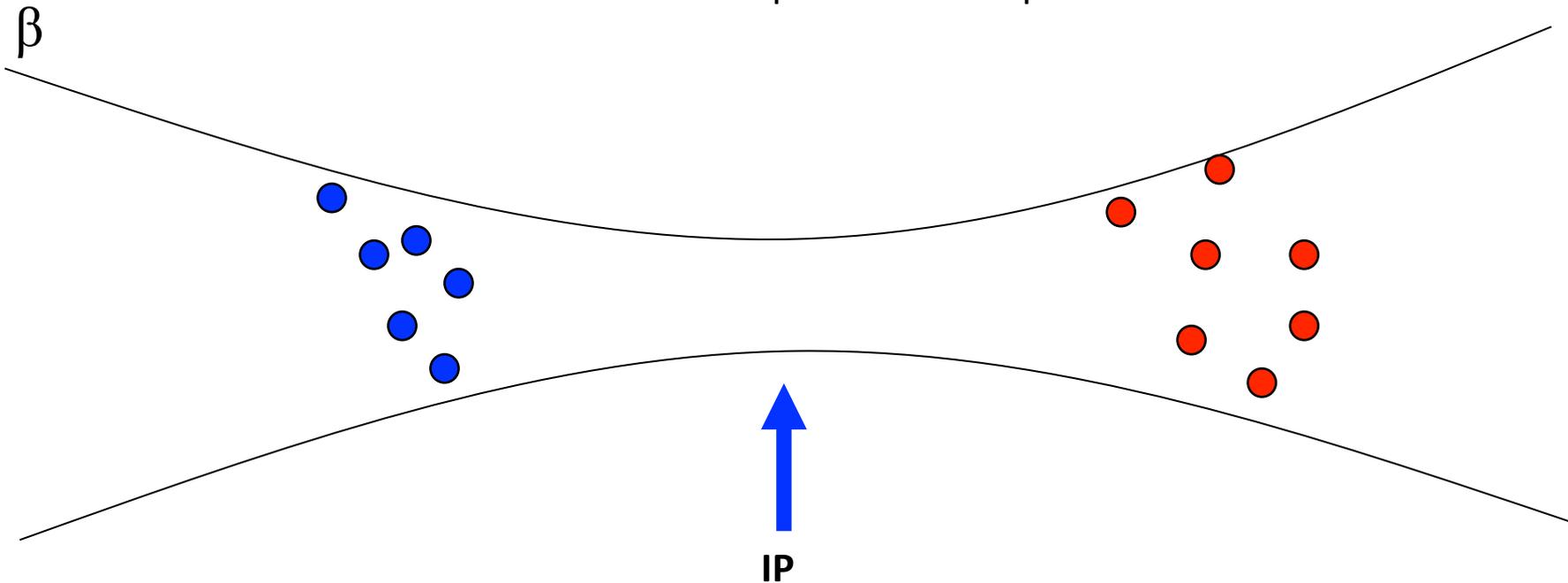


# Luminosità di un *collider*

Numero di particelle per fascio

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

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

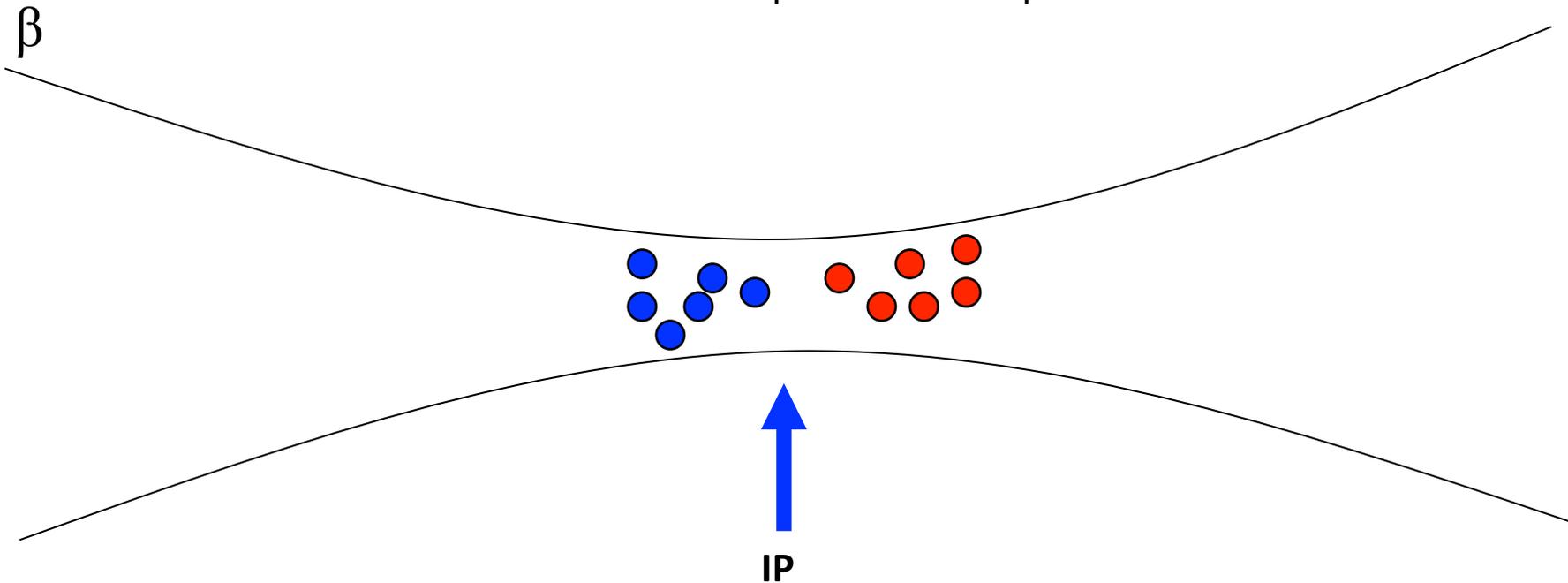


# Luminosità di un *collider*

Numero di particelle per fascio

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

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



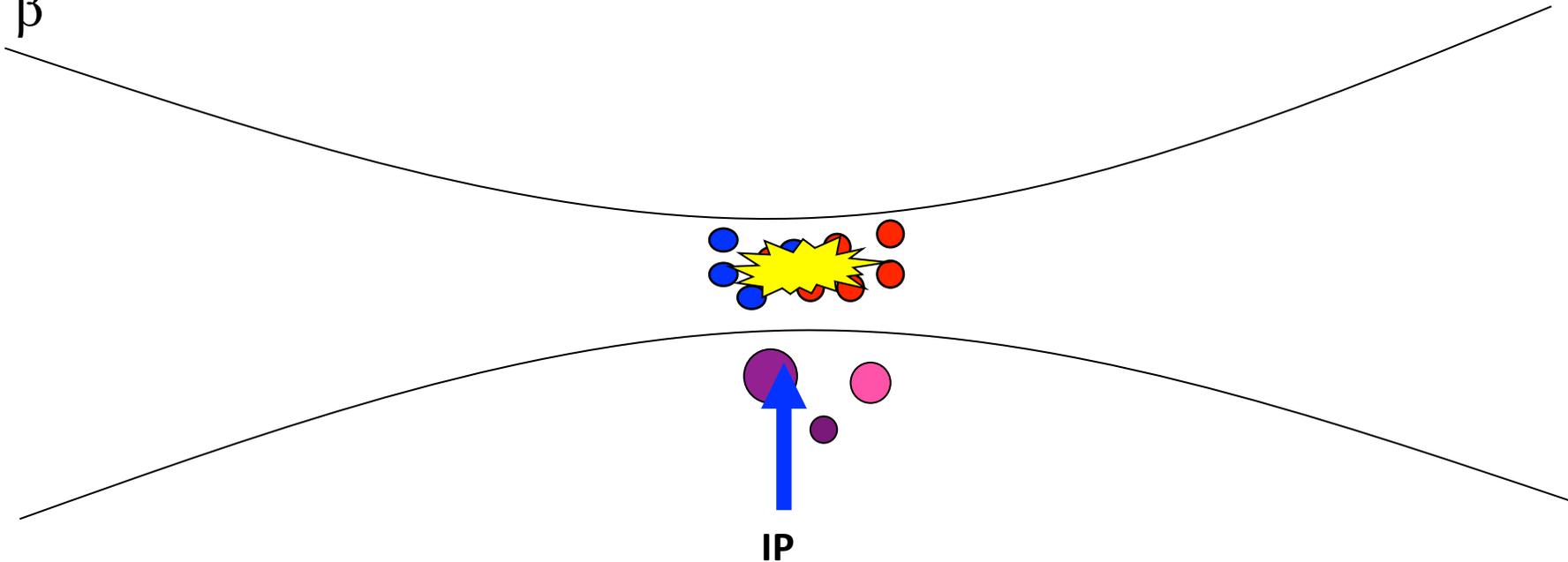
# Luminosità di un *collider*

Numero di particelle per fascio

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

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

$\beta$

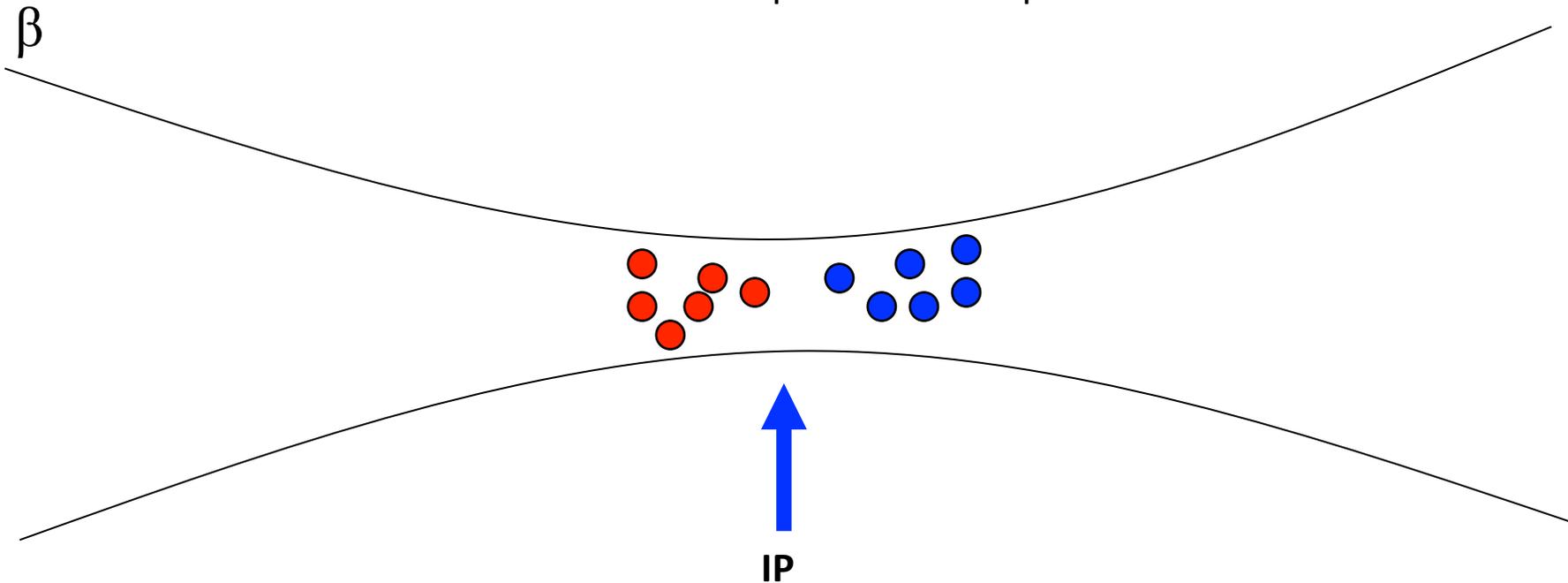


# Luminosità di un *collider*

Numero di particelle per fascio

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

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

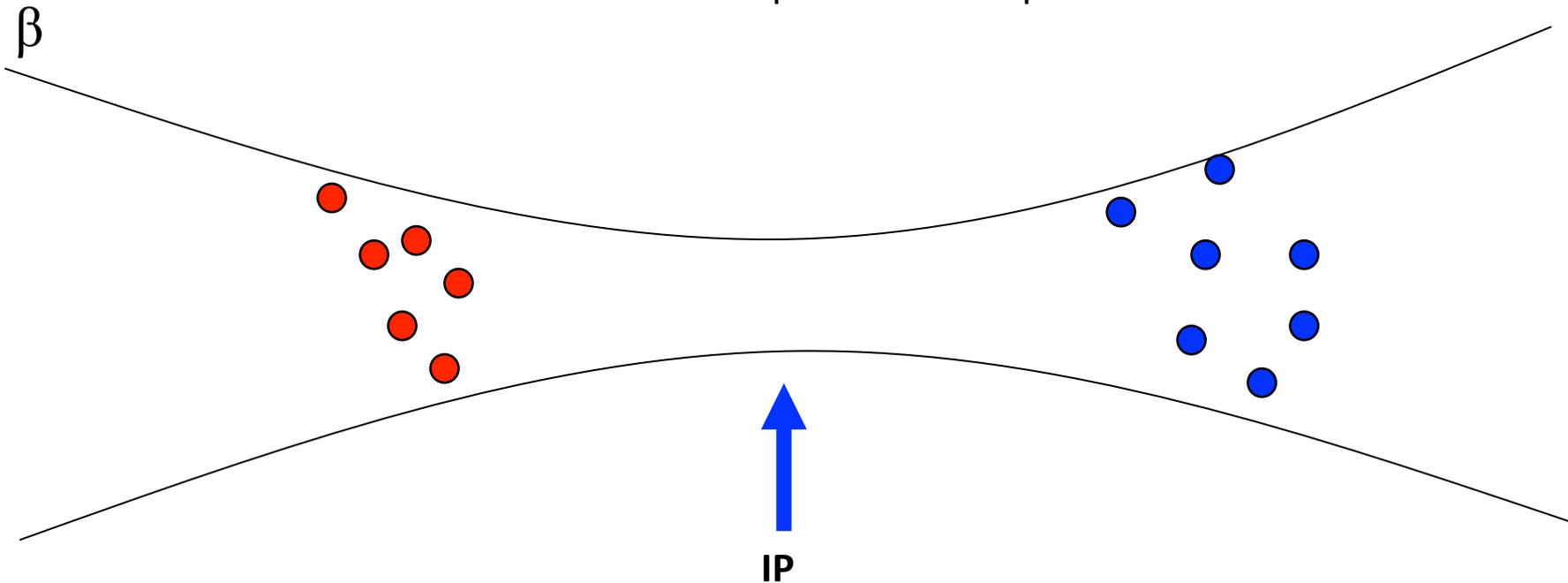


# Luminosità di un *collider*

Numero di particelle per fascio

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

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

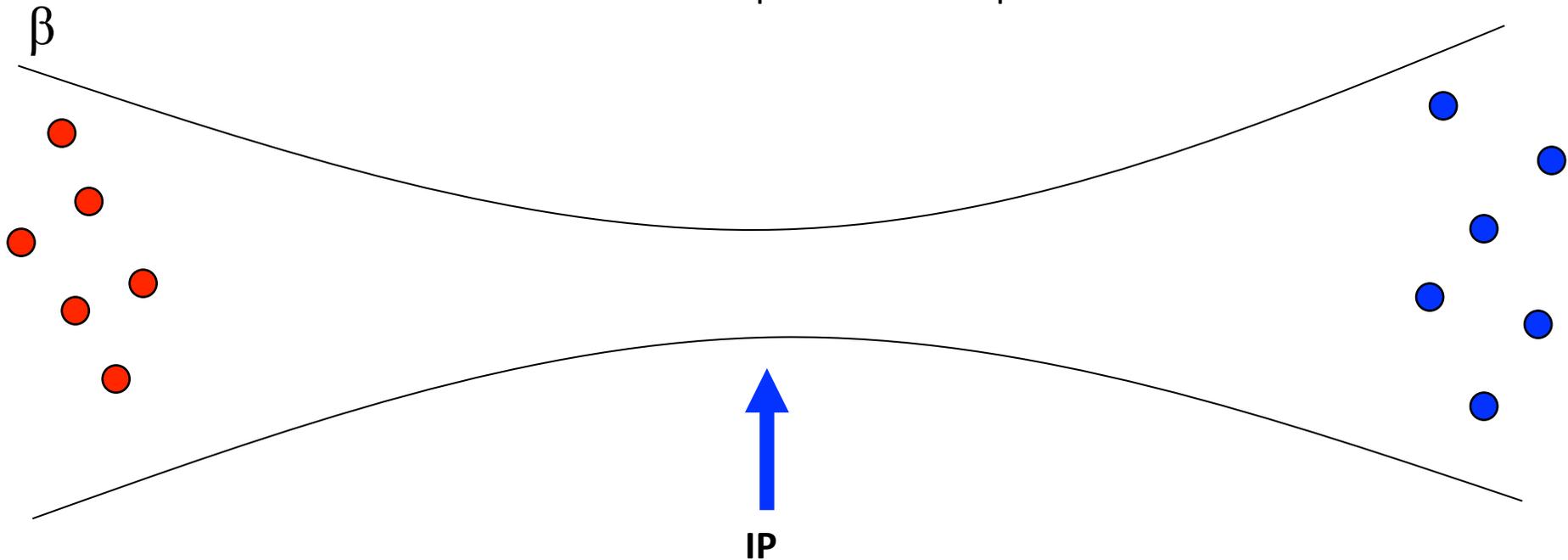


# Luminosità di un *collider*

Numero di particelle per fascio

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

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



# Luminosità di un *collider*: esempio calcolo per DAΦNE

Produzione di  $\Phi$  a DAΦNE

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

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

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

1 mm (pointing to  $\sigma_x$ )

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

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

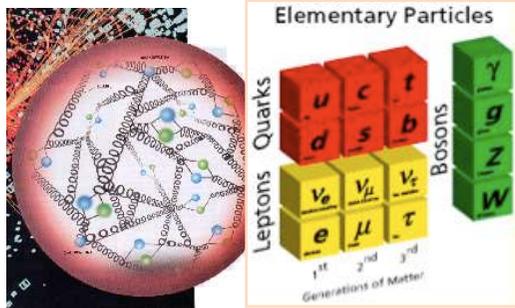


frequenza degli eventi di produzione di  
particelle  $\Phi$   $L\sigma = 300$  eventi/s

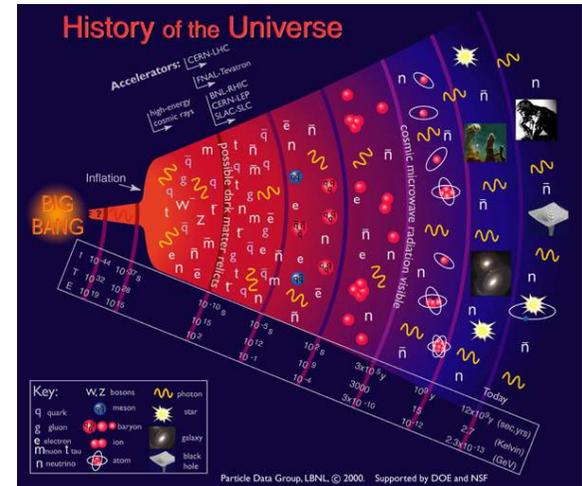
# LUMINOSITA' ED ENERGIA

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**)



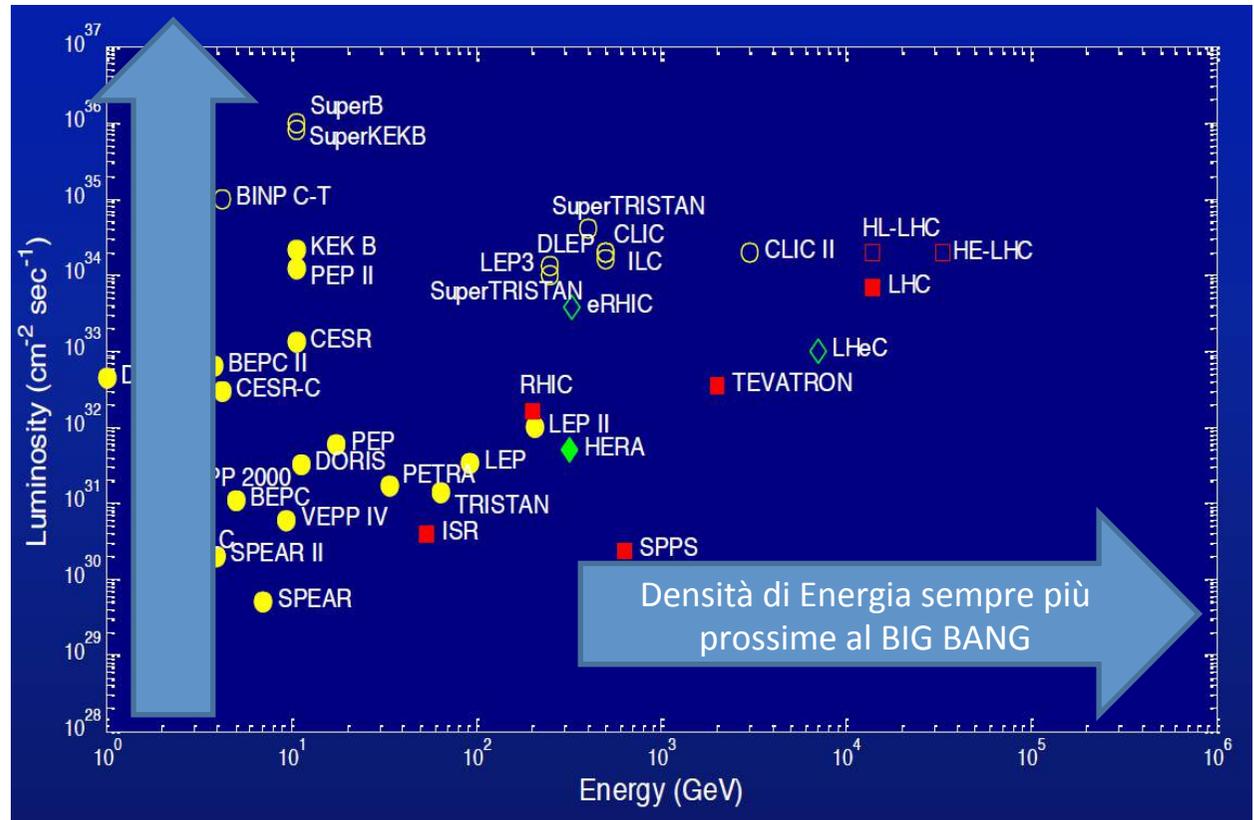
Quantità di eventi di fisica generati/statistica della misura

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)



# 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

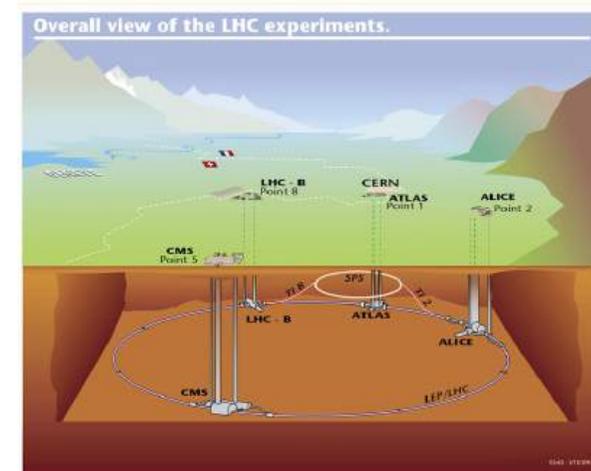
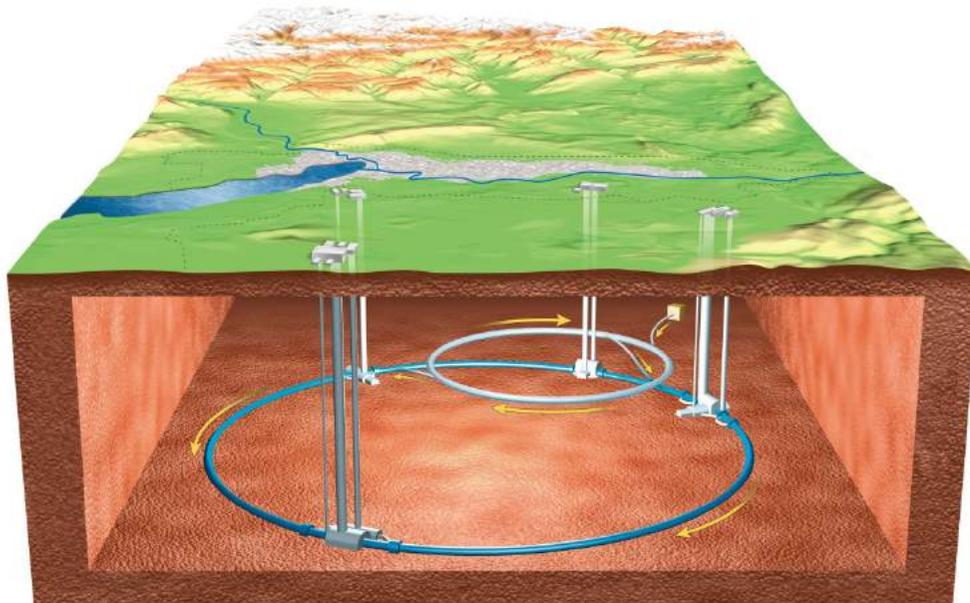
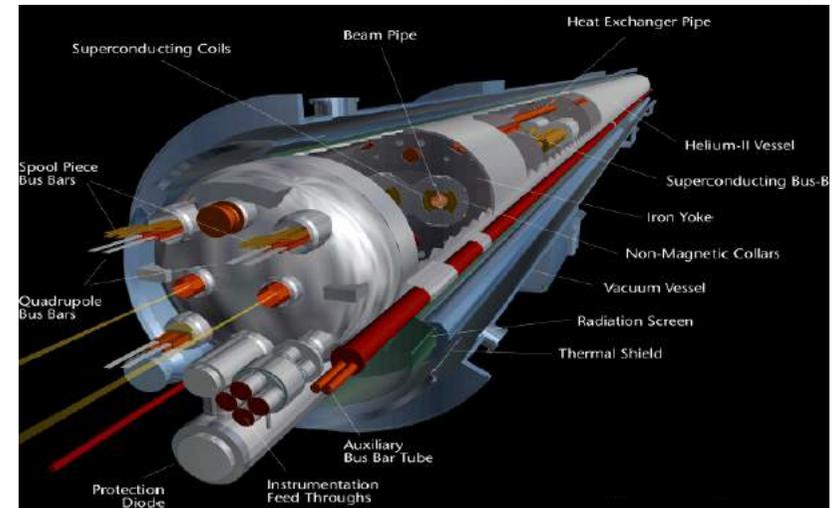
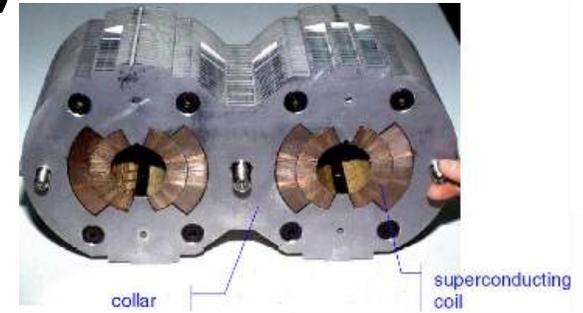


# LHC (Large Hadron Collider) CERN

## 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

$L = 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  (raggiunta  $8 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ )  
 $B_{\text{MAX dipoli}} = 83800 \text{ Gauss}$  con  $I = 11700 \text{ A}$   
 $T = 1.9 \text{ °K}$



# LHC (Large Hadron Collider) CERN

Ingresso dei dipoli criogenici nel tunnel di LHC





# LINEE DI RICERCA PRINCIPALI SUGLI ACCELERATORI DI

## PARTICELLE

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

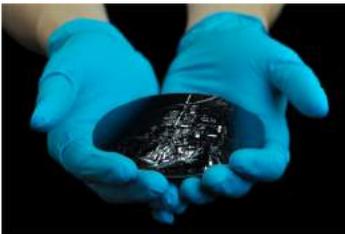
**ALTI GRADIENTI  
ACCELERANTI**

**ALTA ENERGIA**

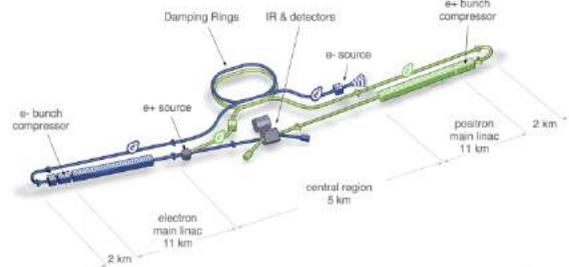
**ELEVATA QUALITA' DI  
FASCIO**

**INTENSITA' DEI FASCI  
DI PARTICELLE**

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



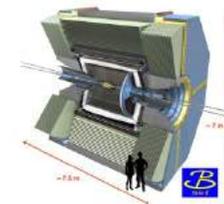
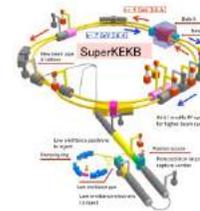
**Collider ad alta energia compatti per fisica fondamentale (es. linear collider)**



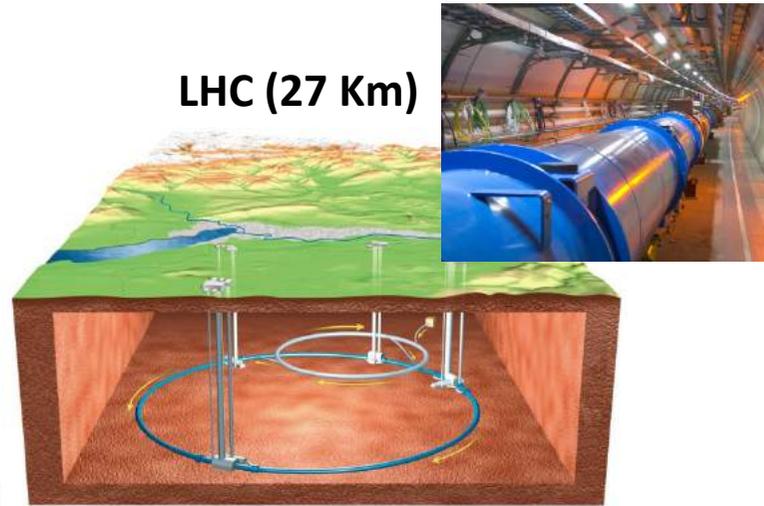
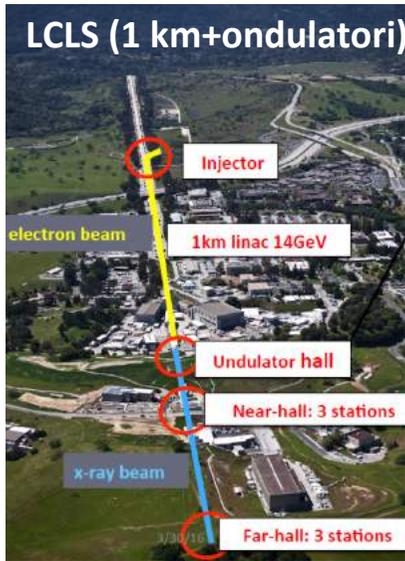
**Sorgenti di luce di sincrotrone di nuova generazione (ESRF upgrade)**



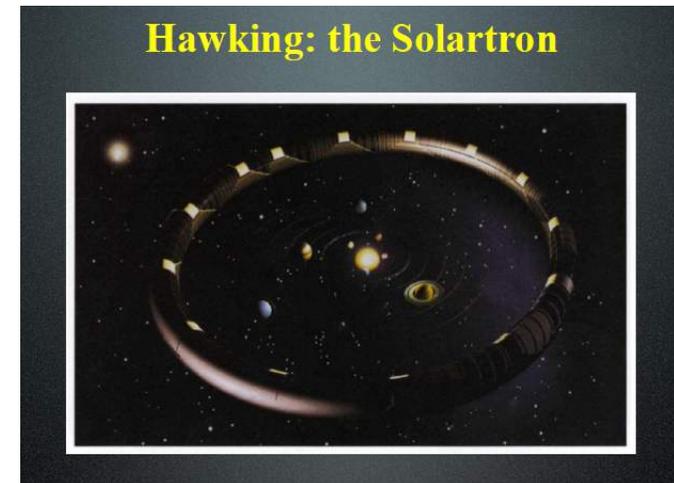
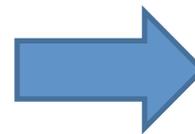
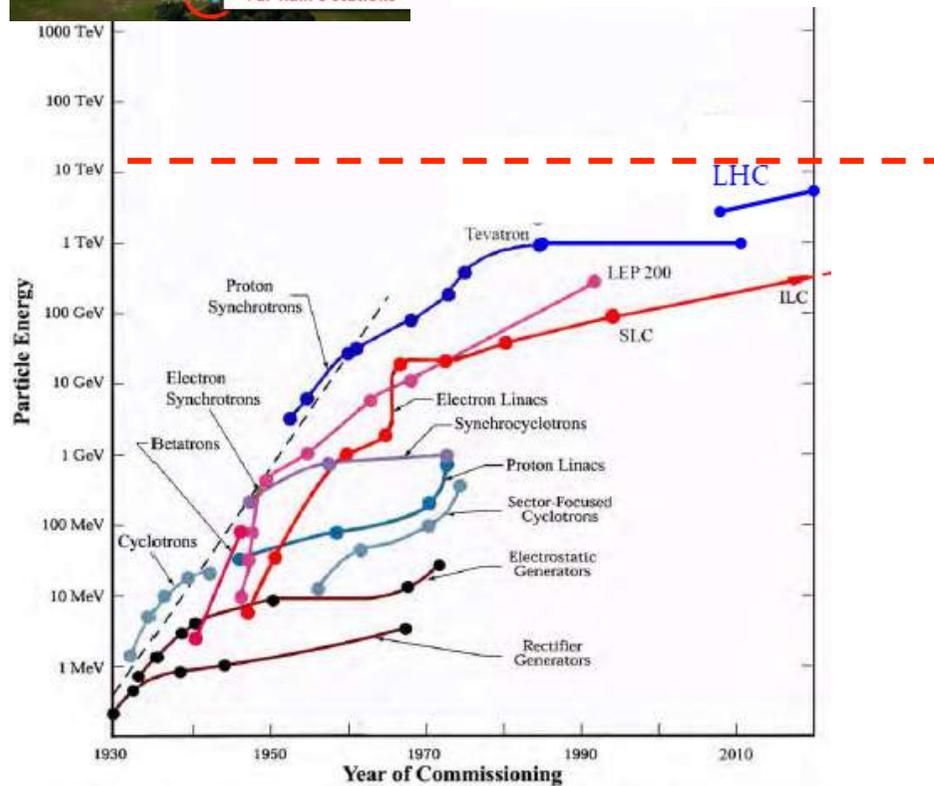
**Collider ad elevata luminosità (superKEKB,...)**



# LA NECESSITA' DI ELEVATI GRADIENTI ACCELERANTI



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



# IL LIMITE DELLE MACCHINE CIRCOLARI AD ALTA

## ENERGIA

Macchine  
adroniche (p,...)

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

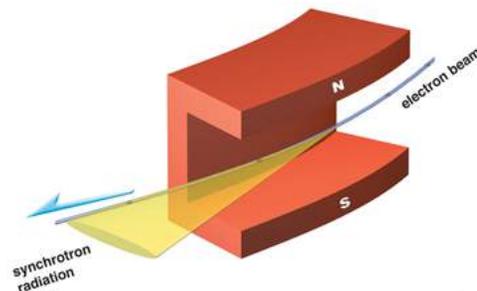


I massimi campi magnetici ottenibili con dipoli superconduttori sono dell'ordine di 15-20 T (8 T LHC)

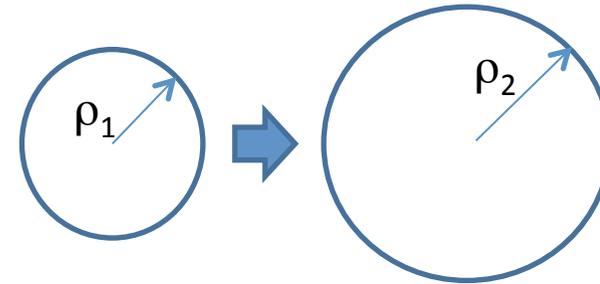
Macchine  
leptoniche  
(elettroni)

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

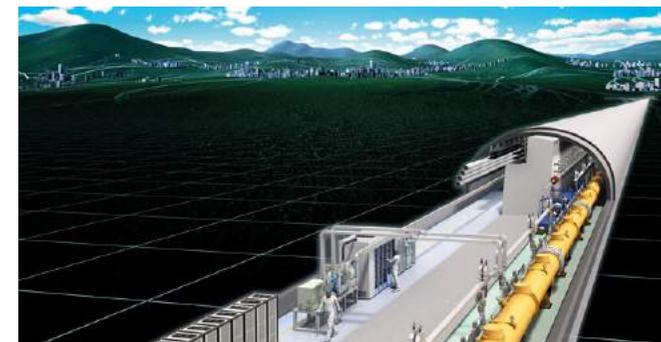
Il limite ancor più che sul raggio di curvatura massimo è dato dalla potenza persa per emissione di luce di sincrotrone



Macchine sempre più grandi



Acceleratore **lineare** con elevatissimi campi acceleranti



# ALTI CAMPI ACCELERANTI $\Rightarrow$ ALTA FREQUENZA

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



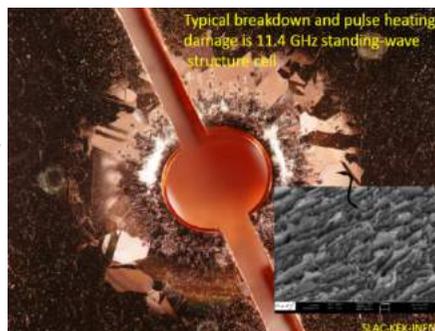
## Alte frequenze di alimentazione

...Compatibilmente con:

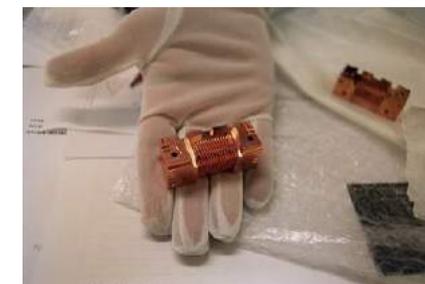
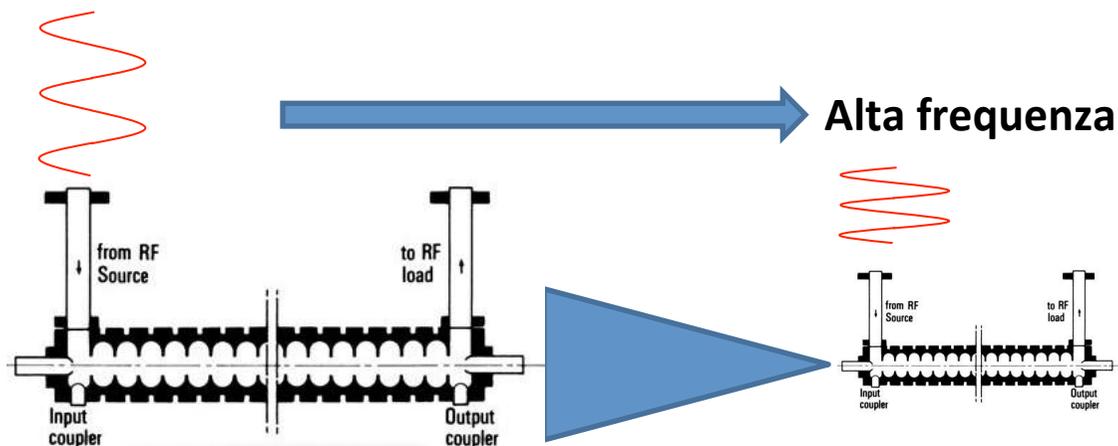
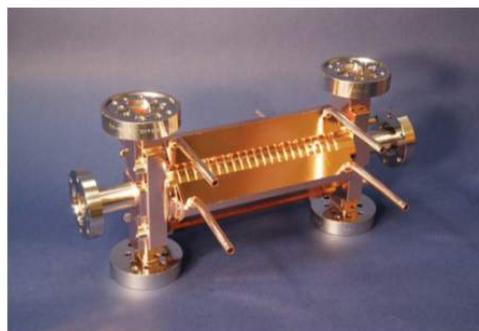
-Disponibilità sorgenti elettromagnetiche

-Dissipazioni sulle strutture (potenze richieste)

-Limiti di scarica (breakdown)



## STRUTTURE METALLICHE



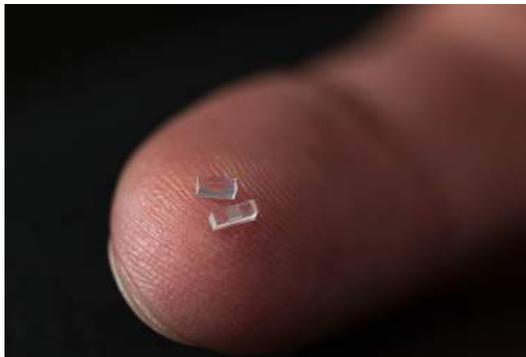
Strutture ad alto gradiente possono raggiungere  **$\sim 100-150$  MV/m** di campo accelerante con numero di scariche limitato.

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

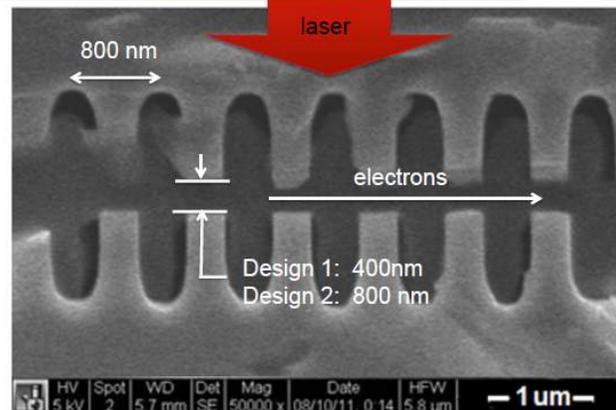
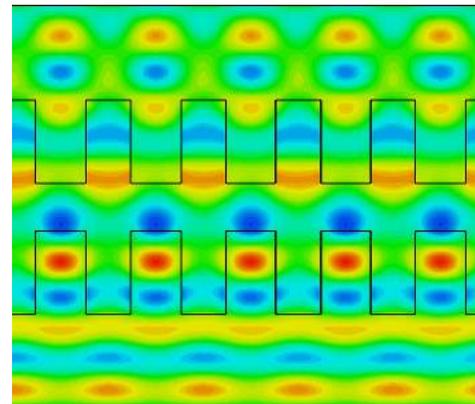
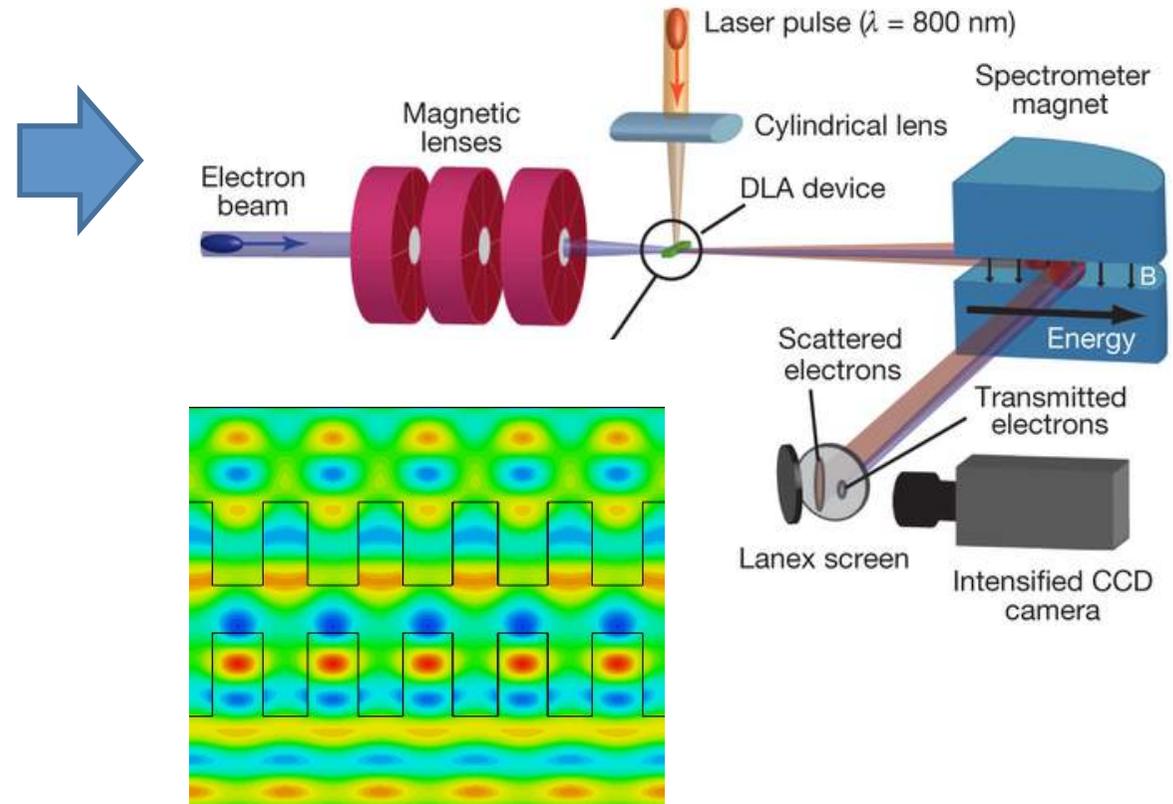
# STRUTTURE DIELETTRICHE ALIMENTATE DA LASER (DLA)

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

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



Si utilizzano **strutture dielettriche** di vario tipo



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

# SFIDE E R&D SU STRUTTURE AD ELEVATA FREQUENZA E MINIATURIZZATE

La ricerca nel campo della miniaturizzazione e delle strutture ad elevatissima frequenza è volta a superare importanti limiti legati a:

⇒ **Quantità di carica e dimensioni dei fasci** che è possibile accelerare (fasci nm)

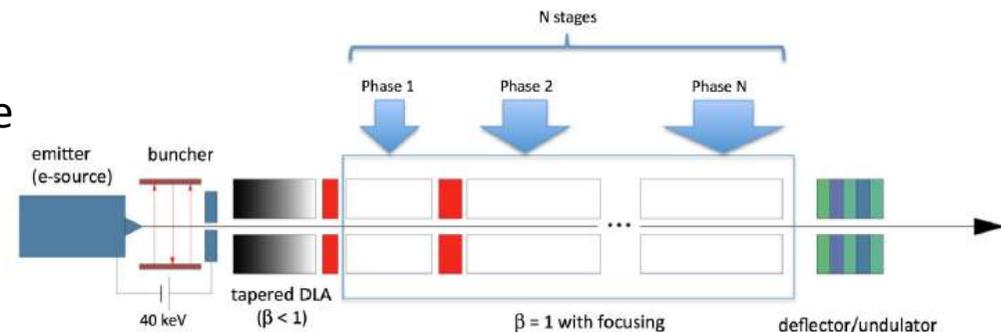
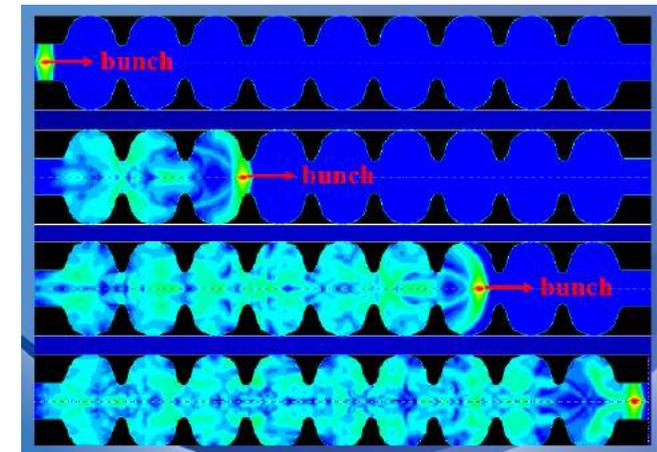
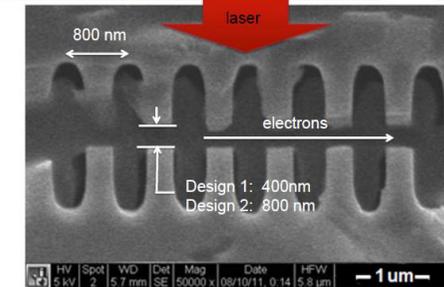
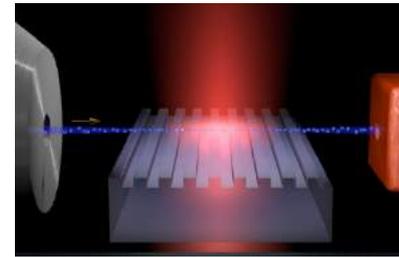
⇒ **Campi scia e instabilità**

⇒ **Sincronizzazione e alimentazione** di strutture multiple (una singola struttura non basta  $1\text{GV/m} \cdot 1\text{mm} = 1\text{MeV}$ !)

⇒ **Qualità di campo** che consentano di ottenere fasci di elevata qualità

⇒ **Problemi di allineamento e stabilizzazione**

.....



# ACCELERAZIONE AL PLASMA

RF Cavity



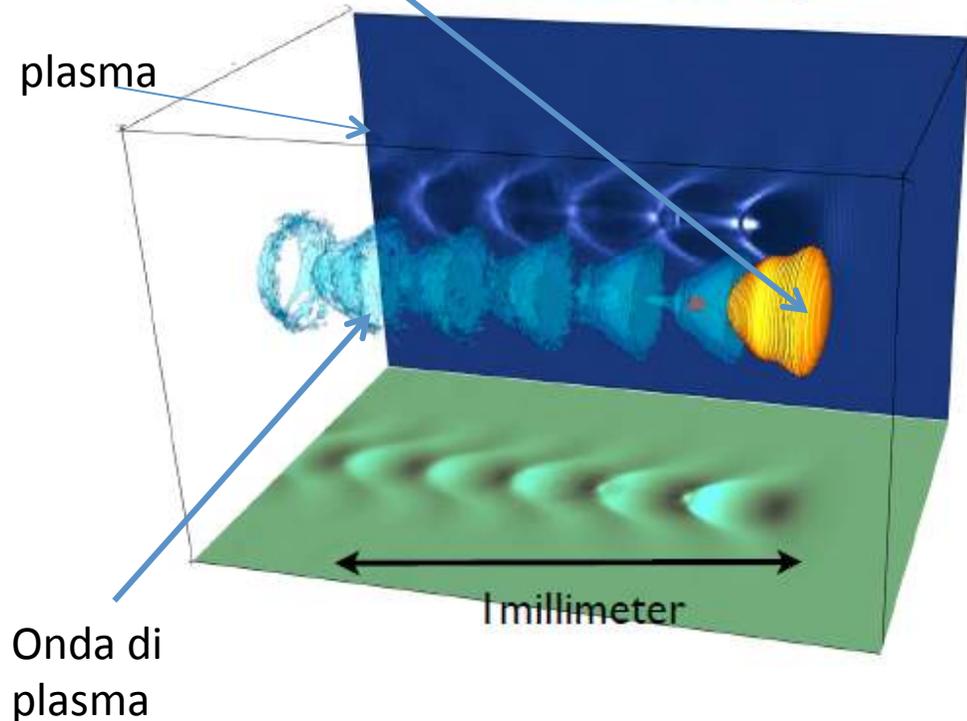
1 meter

Campo elettrico <math><100\text{ MV/m}</math>

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

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

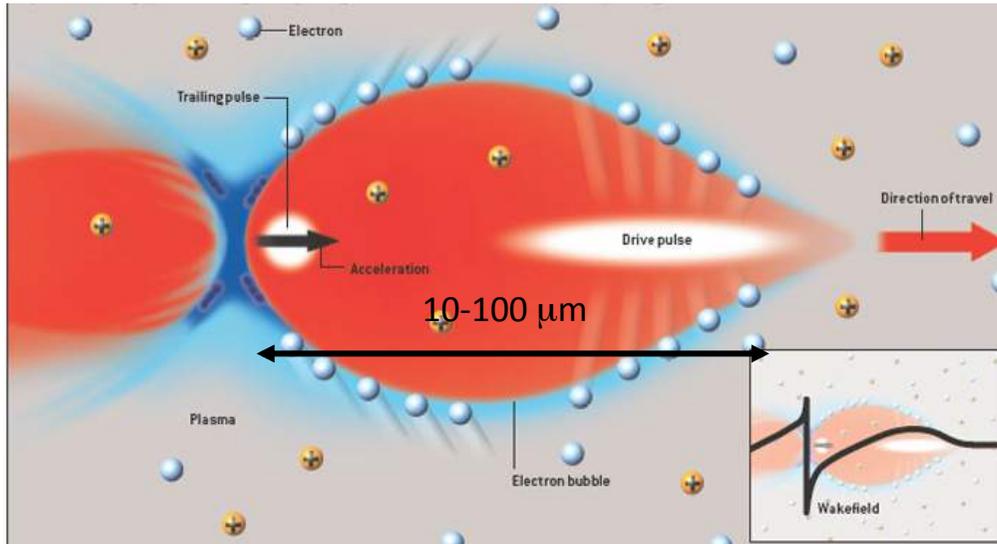
Plasma Cavity



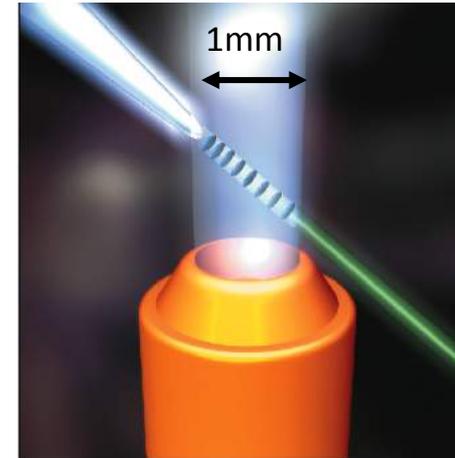
Negli acceleratori al plasma, un'onda di plasma viene generata da un *impulso laser* (o da un *pacchetto di elettroni*) che attraversa il plasma stesso. Nell'onda di plasma si possono raggiungere campi >100 GV/m

km  $\longrightarrow$  m

# ACCELERAZIONE LASER-PLASMA (LWFA)



laser Gas jet



VIDEO

Elettroni accelerati

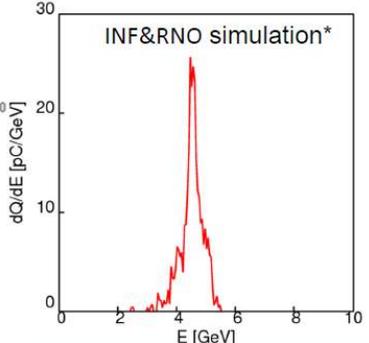
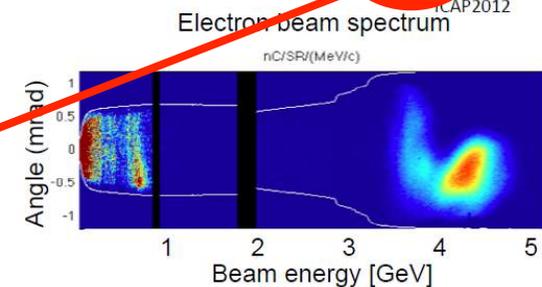
$$E_0 = \frac{m_e c \omega_p}{e} \approx 100 \left[ \frac{\text{GeV}}{m} \right] \cdot \sqrt{n_0 [10^{18} \text{ cm}^{-3}]}$$

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

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



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

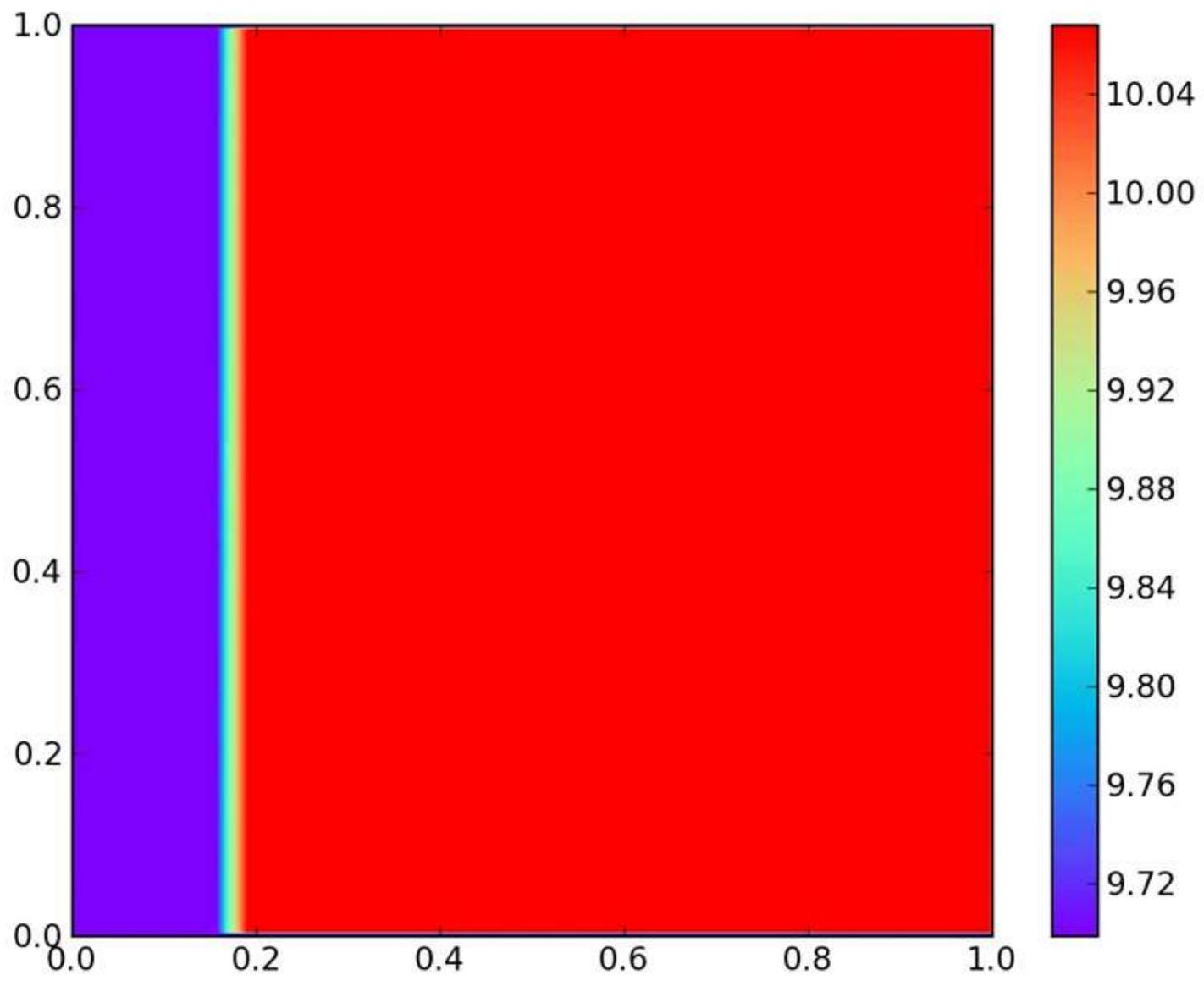


$$E_{\text{acc}} \cong 50 \text{ GV/m}$$

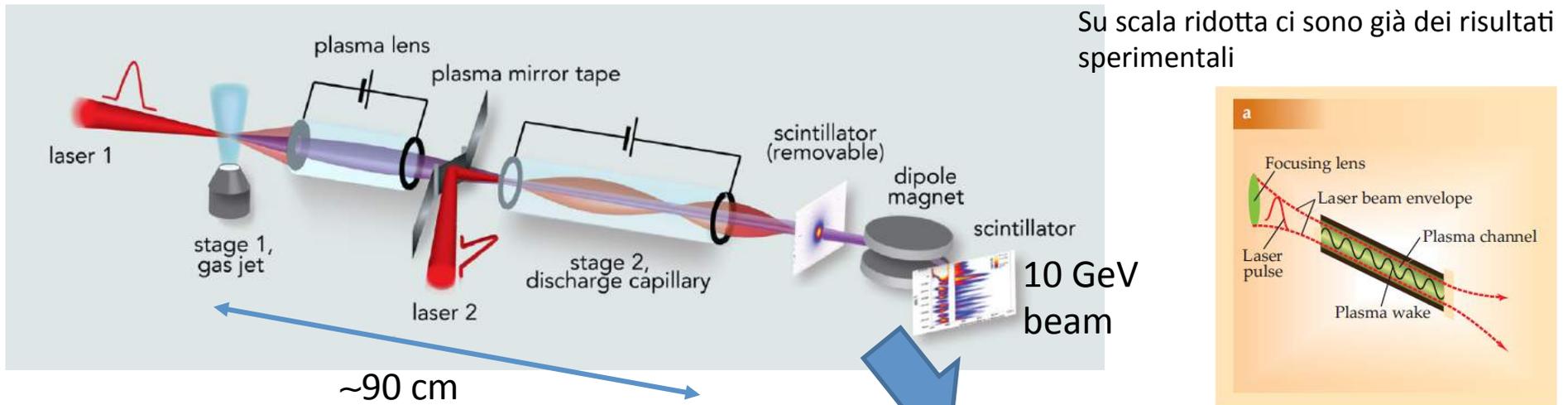
- **Laser** (E=15 J):
  - Measured) longitudinal profile ( $T_0 = 40 \text{ fs}$ )
  - Measured far field mode ( $w_0 = 53 \mu\text{m}$ )
- **Plasma**: parabolic plasma channel (length 9 cm,  $n_0 \sim 6\text{-}7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ )

W.P. Leemans et al., PRL 2014

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

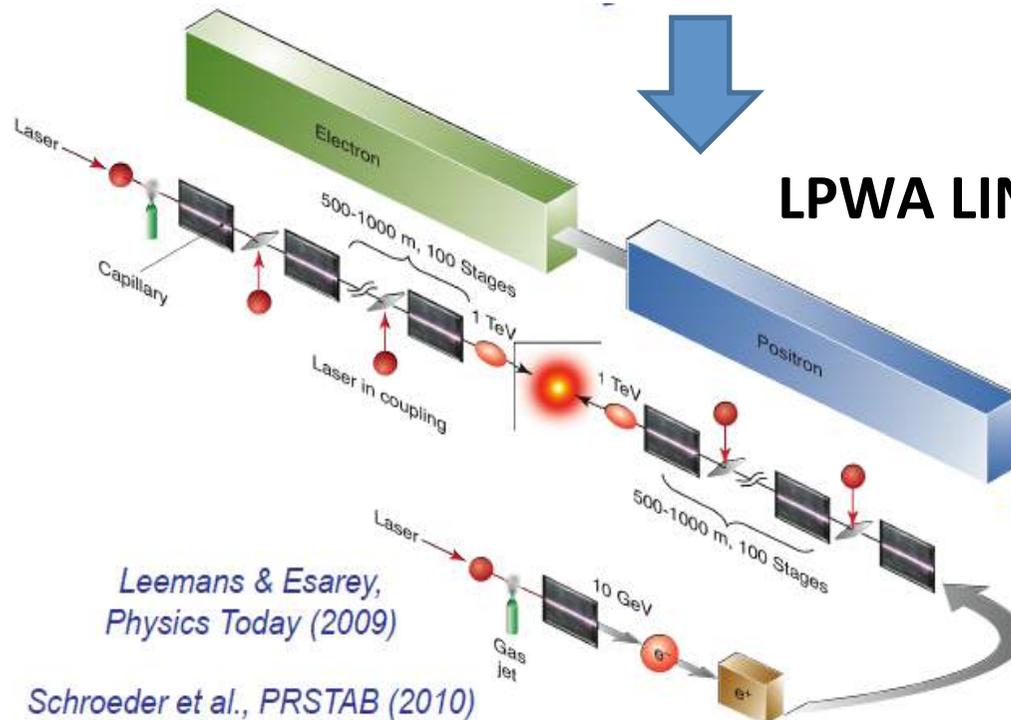


# ACCELERAZIONE LASER-PLASMA: MULTI-GeV LINAC



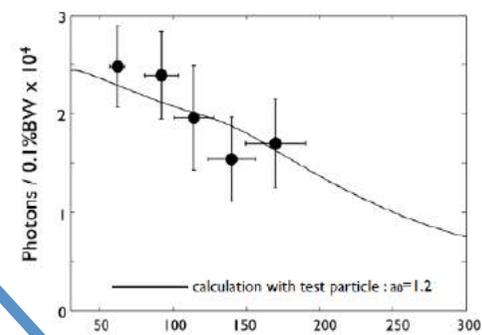
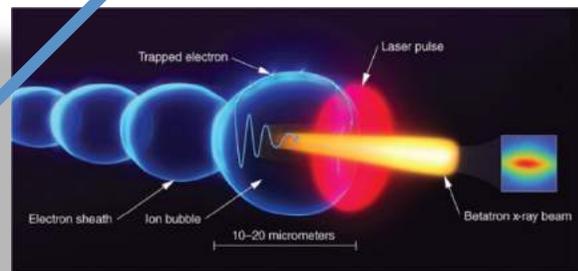
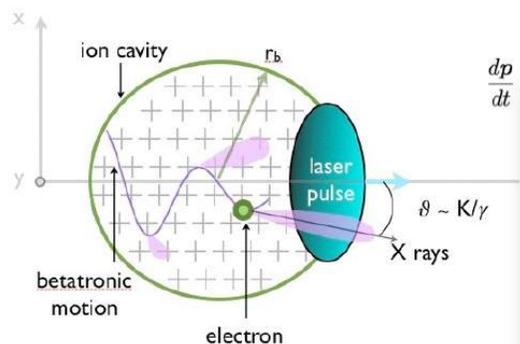
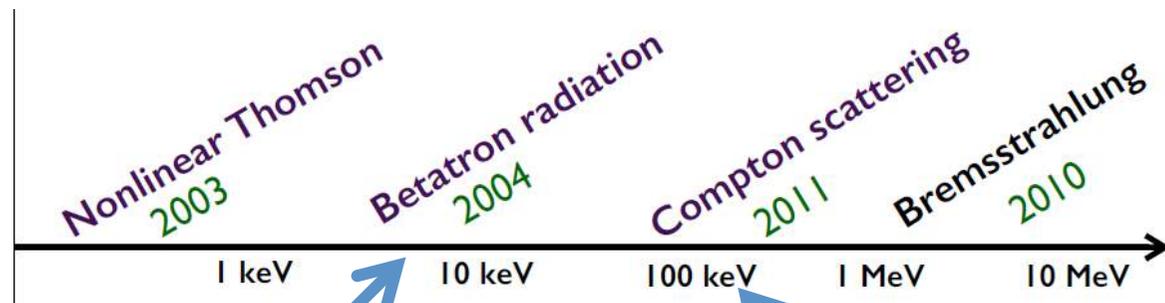
**SORGENTI DI RADIAZIONE COMPATTE BASATE SU LPWA**

**LPWA LINEAR COLLIDER?**

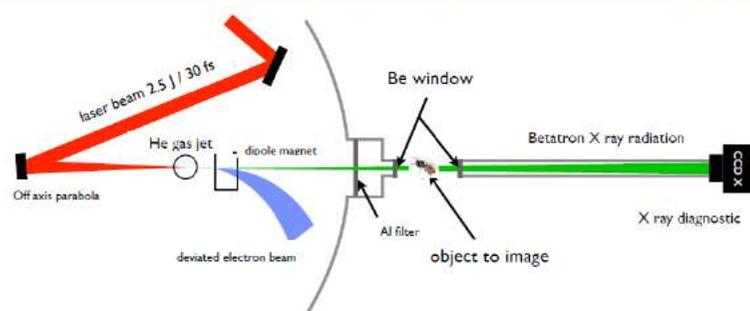


- LPA-linear collider:
- 50 stages (1 TeV collider)
- 10 GeV/stage
- requires ~10 J laser (at tens of kHz, hundreds of kW)
- $n=10^{17} \text{ cm}^{-3}$  (set by laser depletion) 2

# SORGENTI DI RADIAZIONE COMPATTE BASATE SU

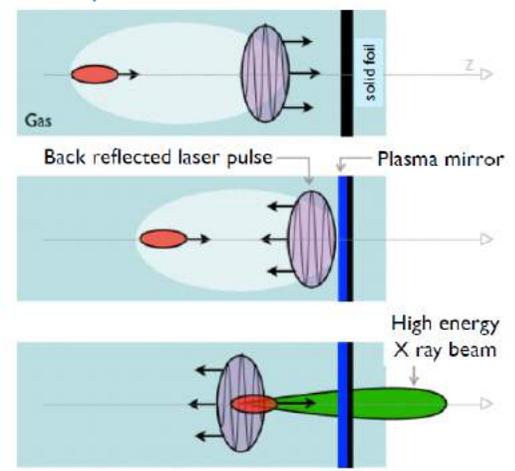
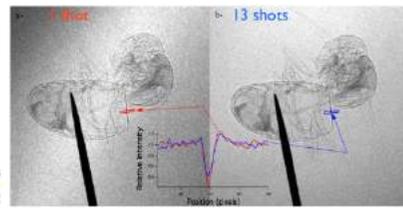


## X ray Phase Contrast Radiography: Experiments



- 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)

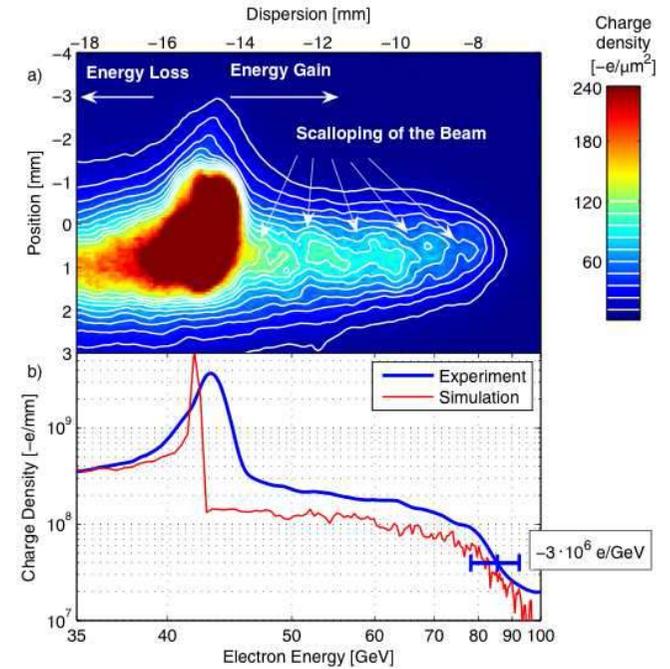
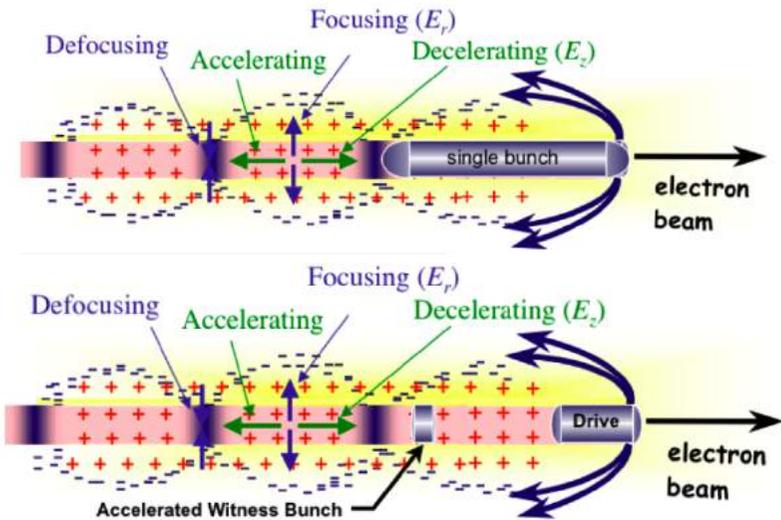


The 6th International Conference "Charged & Neutral Particles Channeling Phenomena - Channeling 2014, Capri, Italia, October 5-10 (2014)



Courtesy V. Malka

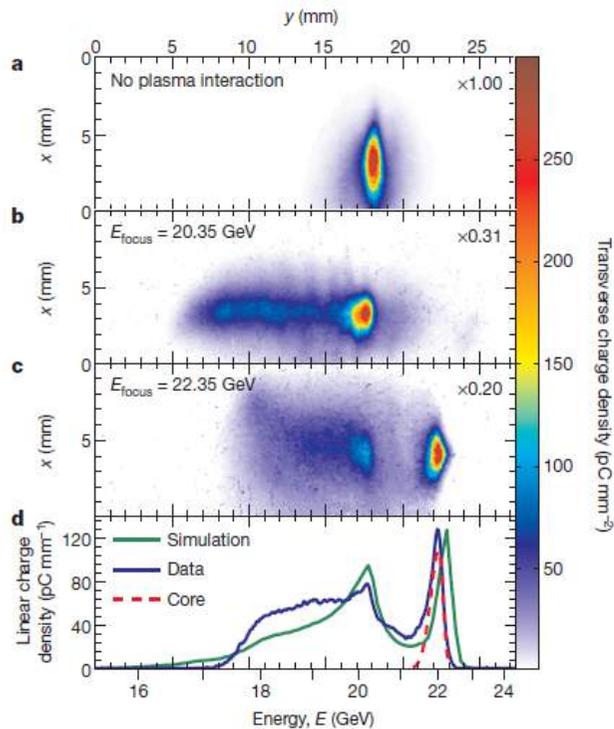
# ACCELERAZIONE ELETTRONI-PLASMA (PWFA)



Blumenfeld, I. et al. *Energy doubling of 42 GeV electrons in a metre-scale plasma wakefield accelerator.* *Nature* 445, 741–744 (2007).

$$E_{acc} = 40 \text{ GV/m}$$

A 20-40GeV LINAC has been required



$$70 \text{ pC}$$

$$E_{acc} = 4.5 \text{ GV/m}$$

Litos, M. et al. *High-efficiency acceleration of an electron beam in a plasma wakefield accelerator.* *Nature* 515, 92–95 (2014).

VIDEO

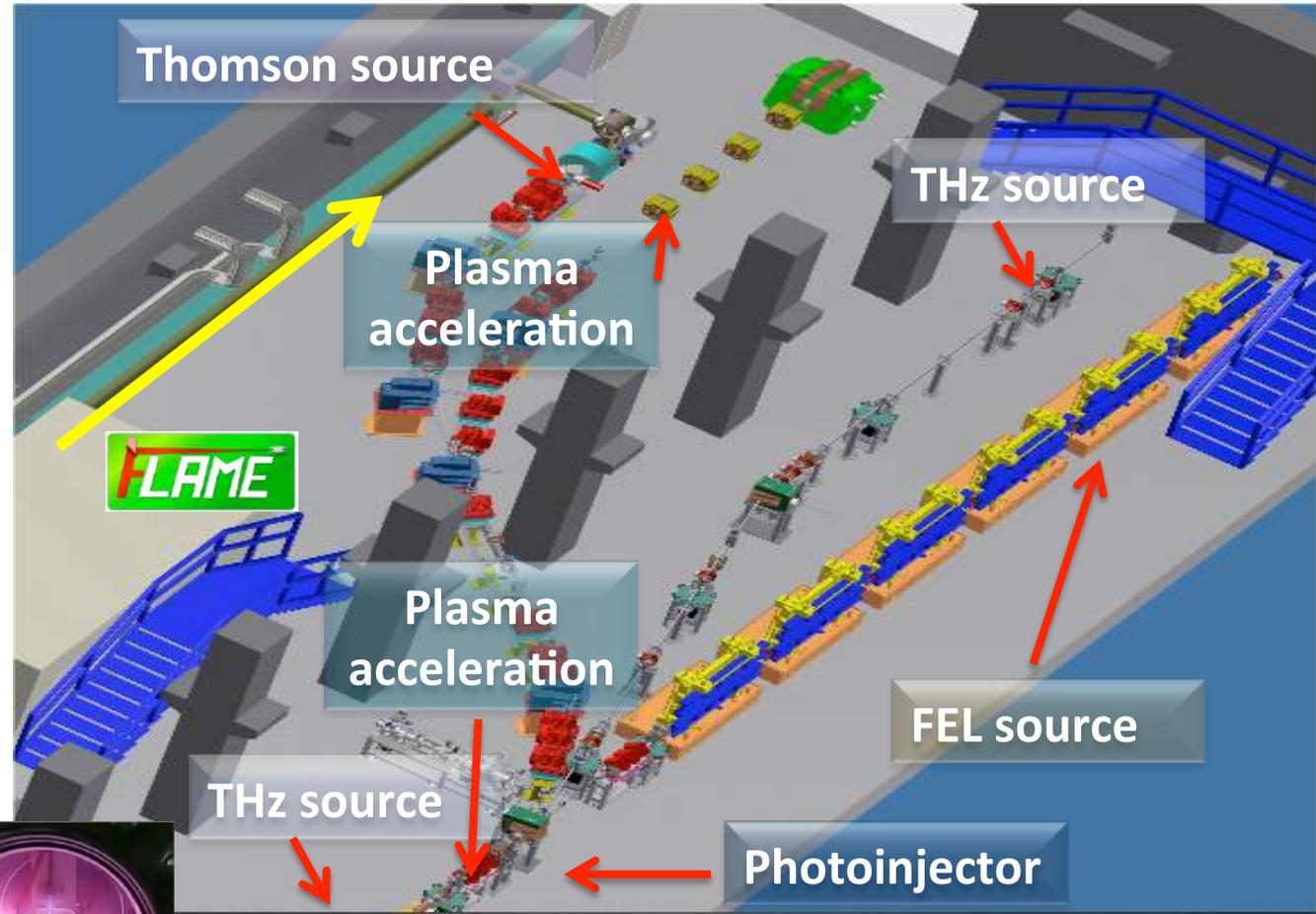
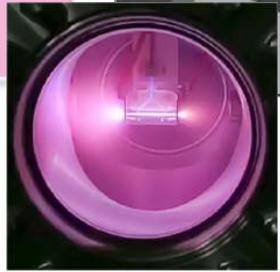


# ACCELERAZIONE AL PLASMA A SPARC\_LAB

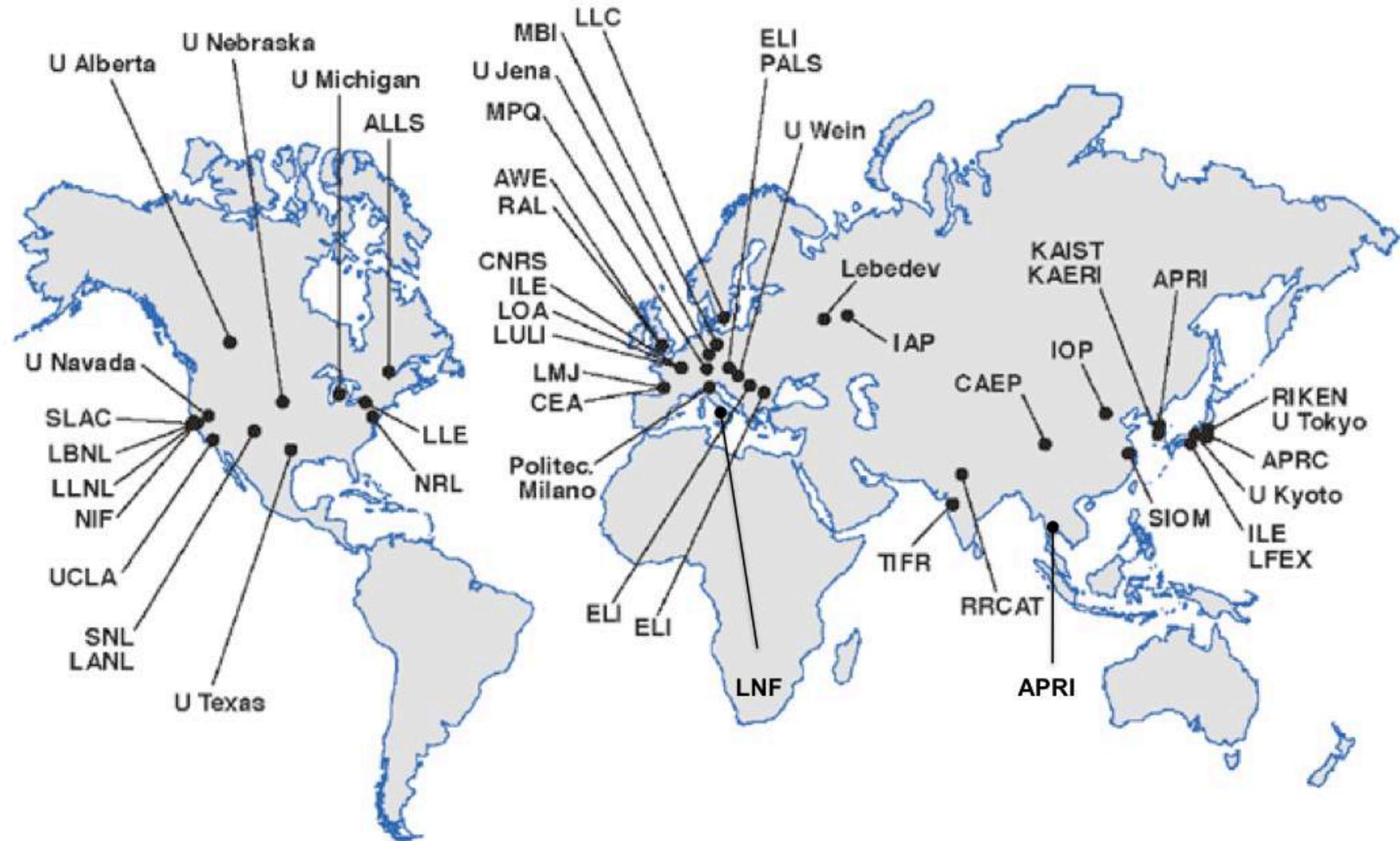


300 TW, < 25 fs  
Ti:Sa laser

- R&D on advanced beam dynamics
- R&D on FEL radiation
- Developing a THz source
- Developing a Thomson source
- R&D on plasma acceleration

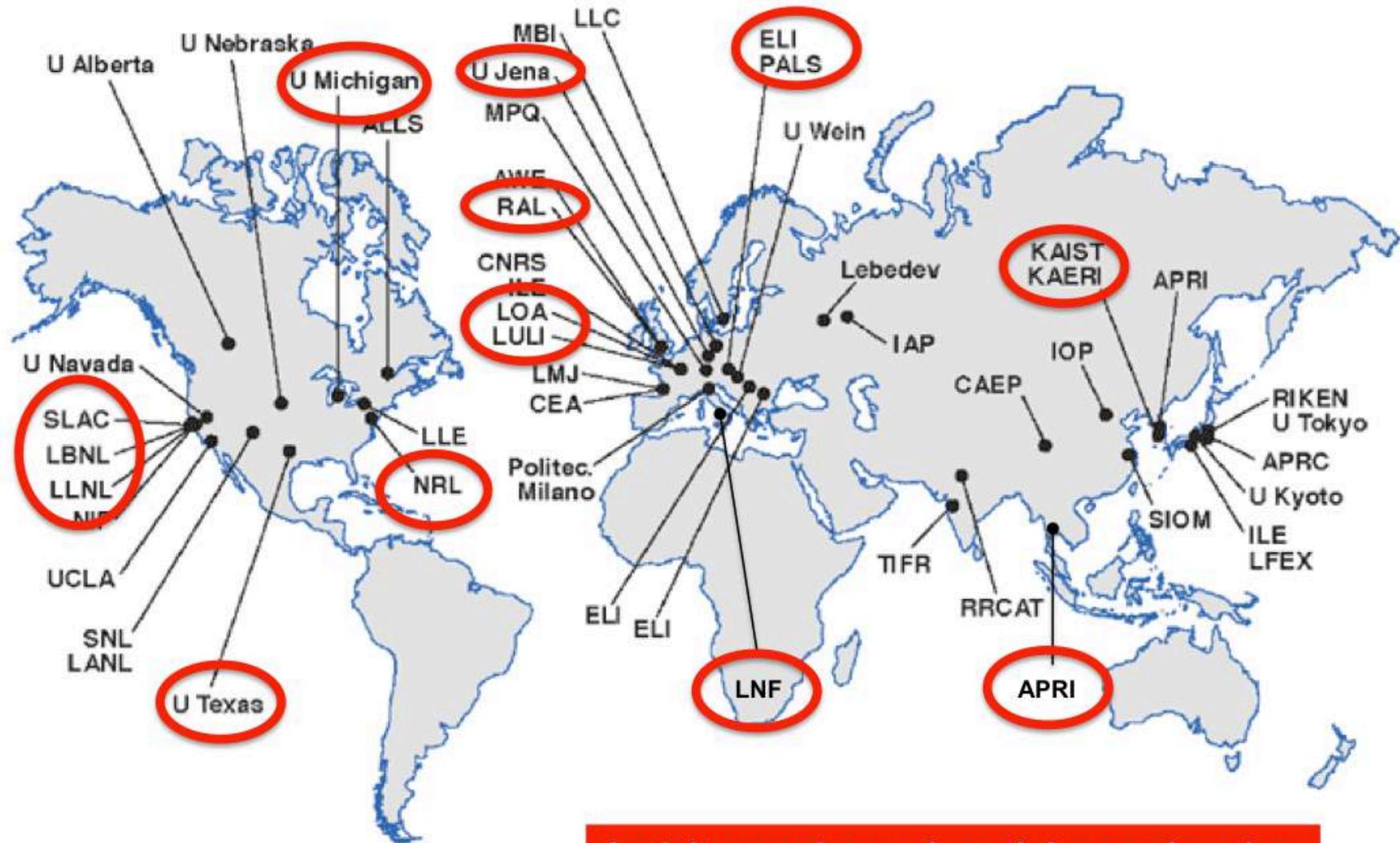


# ULTRA-HIGH INTENSITY LASER FACILITIES



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

# ULTRA-HIGH INTENSITY LASER FACILITIES



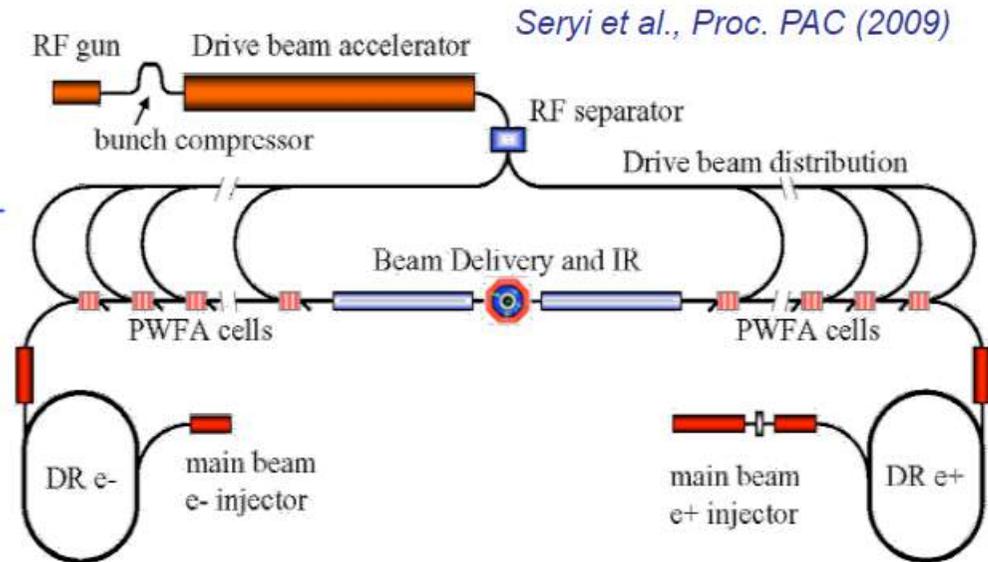
<http://www.icuil.org/>

Activity on charged particle acceleration

# ACCELERAZIONE ELETTRONI-PLASMA: MULTI-GeV LINAC

...per fisica fondamentale

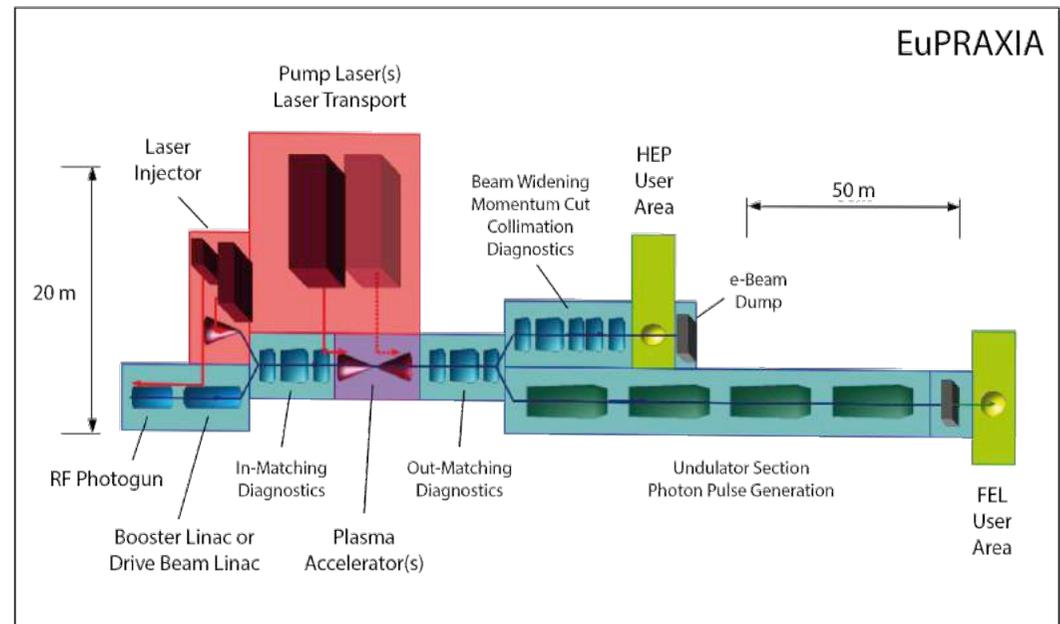
- PWFA-linear collider:
- two-beam accelerator geometry
- 25 GeV drive beams
- 19 plasma stages (1 TeV)
- $n=10^{17} \text{ cm}^{-3}$  (set by 30  $\mu\text{m}$  driver bunch length)



...per “user facilities” con elettroni accelerati da plasm



L'Unione Europea supporterà con tre milioni di euro del programma Horizon 2020 lo sviluppo di un nuovo acceleratore di particelle al plasma. Il progetto europeo chiamato EuPRAXIA (**E**uropean **P**lasma **R**esearch **A**ccelerator with **eX**cellence **I**n **A**pplications) produrrà uno studio per un acceleratore europeo al plasma, concentrandosi sull'applicazione di nuove tecnologie. L'accelerazione al plasma consentirebbe di ridurre significativamente i costi e le dimensioni degli acceleratori di particelle per le applicazioni in campo scientifico, medico e industriale.



# LINEE DI RICERCA PRINCIPALI SUGLI ACCELERATORI DI

## PARTICELLE

Le principali 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**

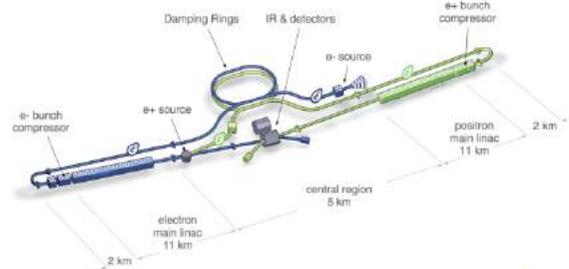
Macchine **compatte** anzichè acceleratori chilometrici come sorgenti di radiazione (es FEL, acceleratori medicali,...).



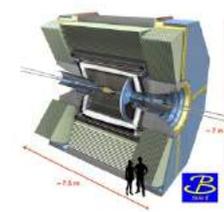
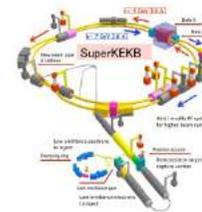
**Sorgenti di luce di  
sincrotrone** di  
nuova generazione  
(ESRF upgrade)



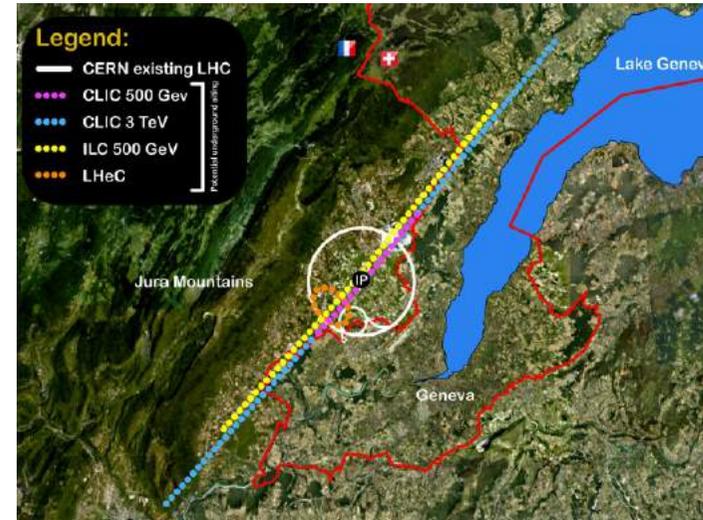
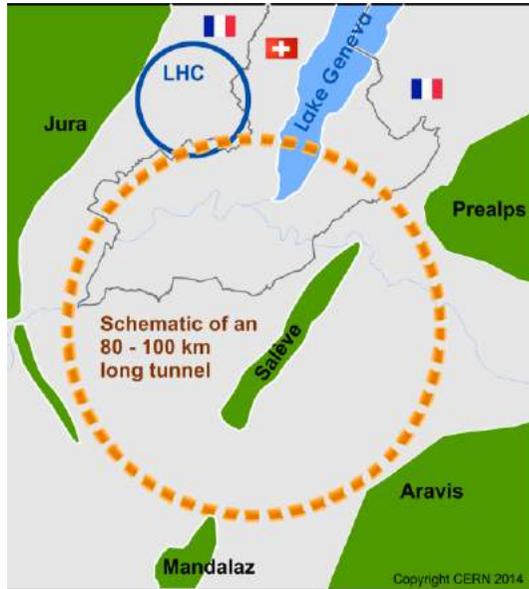
**Collider ad alta energia  
compatti per fisica  
fondamentale (es. linear  
collider)**



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

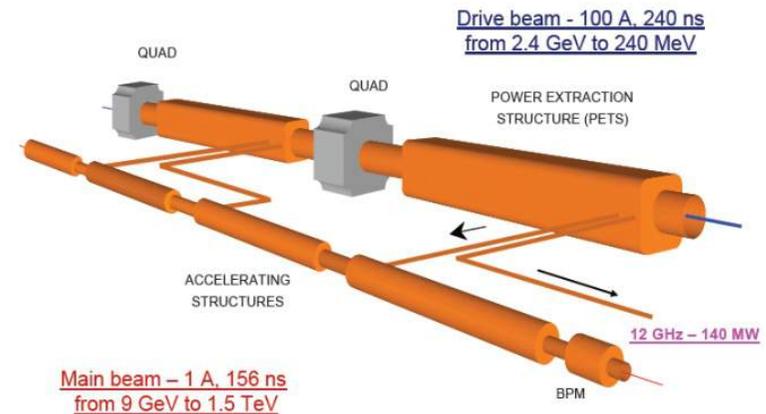


# PROPOSTE DI FUTURI COLLIDER AL CERN DOPO LHC

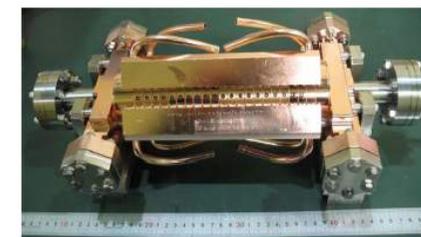


## FCC hadron collider parameters

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



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



# CONCLUSIONI

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

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

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

Quali i **possibili scenari** futuri?

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

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

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

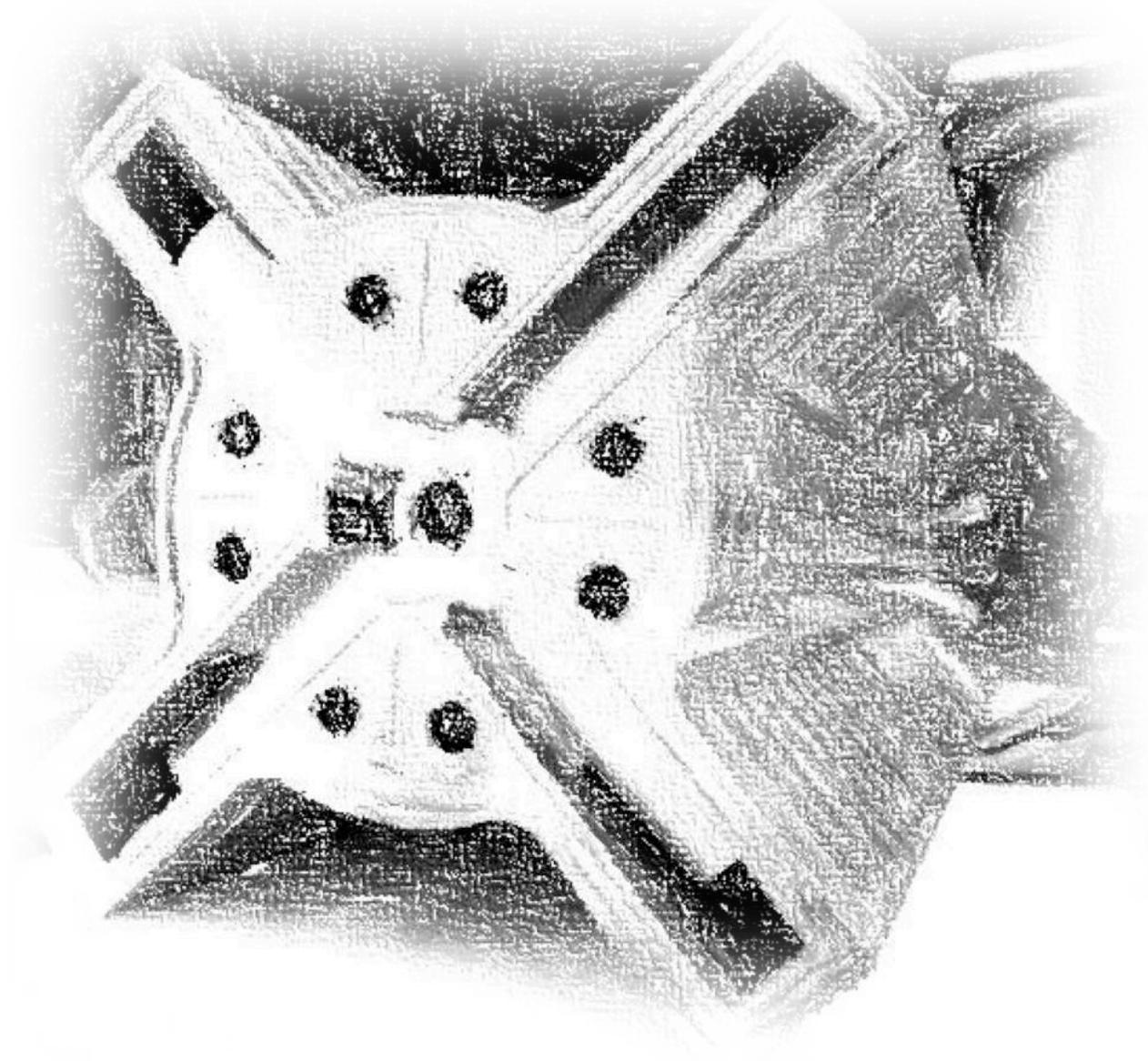
⇒**NUOVE IDEE** E IMPORTANTI RISULTATI HANNO APERTO NUOVE E PROMETTENTI STRADE

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

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

# Ringrazio...

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



# Alcuni link Bibliografici

## [Scuole acceleratori](#)

CERN Accelerator School:

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

## [JUAS](#)

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

USPAS

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

M. Sands, The Physics of Electron Storage Rings: An Introduction, SLAC- 121 UC-28 (ACC)  
<http://www.slac.stanford.edu/pubs/slacreports/slac-r-121.html>

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

Animazione LINAC SLAC

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