

Gli acceleratori di particelle parte II

David Alesini

Divisione Acceleratori

LNF-INFN



IN BREVE: COME SI ACCELERANO LE PARTICELLE

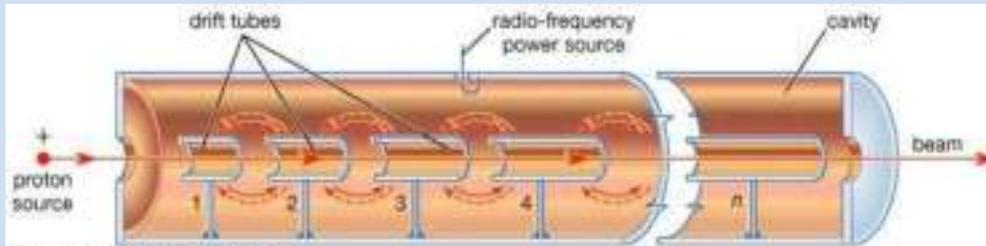
\vec{p} = momentum

\vec{v} = velocity

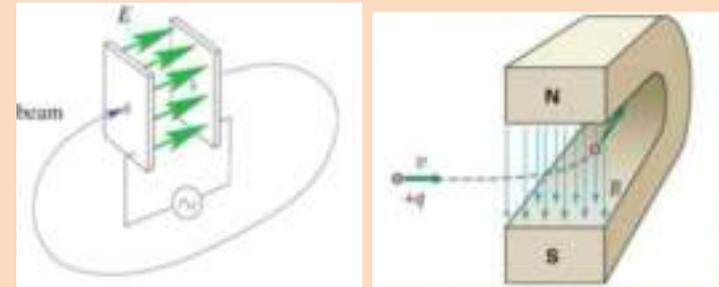
q = charge

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

LINEARI



CIRCOLARI

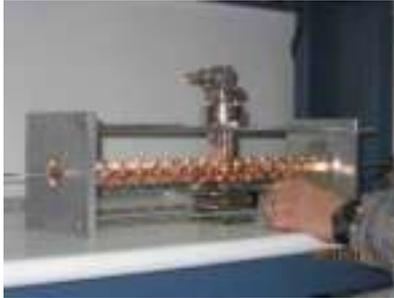


Fermilab Accelerator Complex



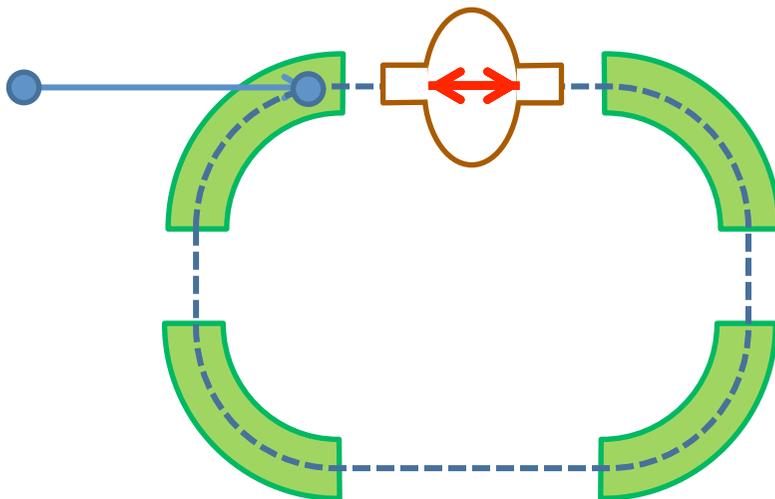
ACCELERATORI LINEARI E SINCROTRONI

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



m  km

Con l'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**.

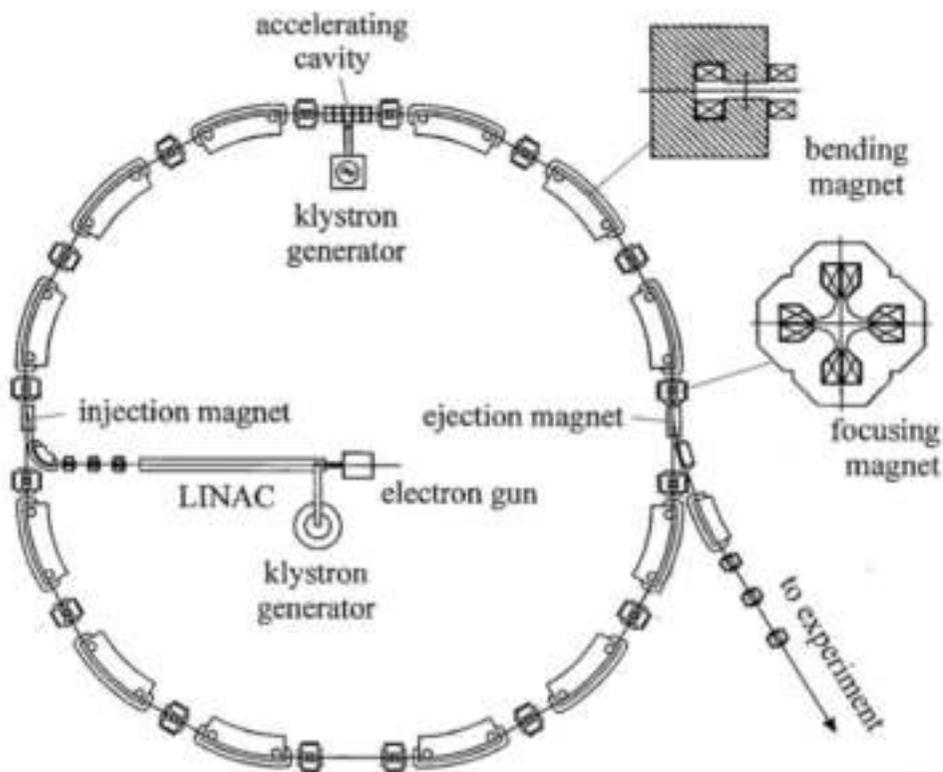


ACCELERATORI CIRCOLARI: IL SINCROTRONE

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).



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

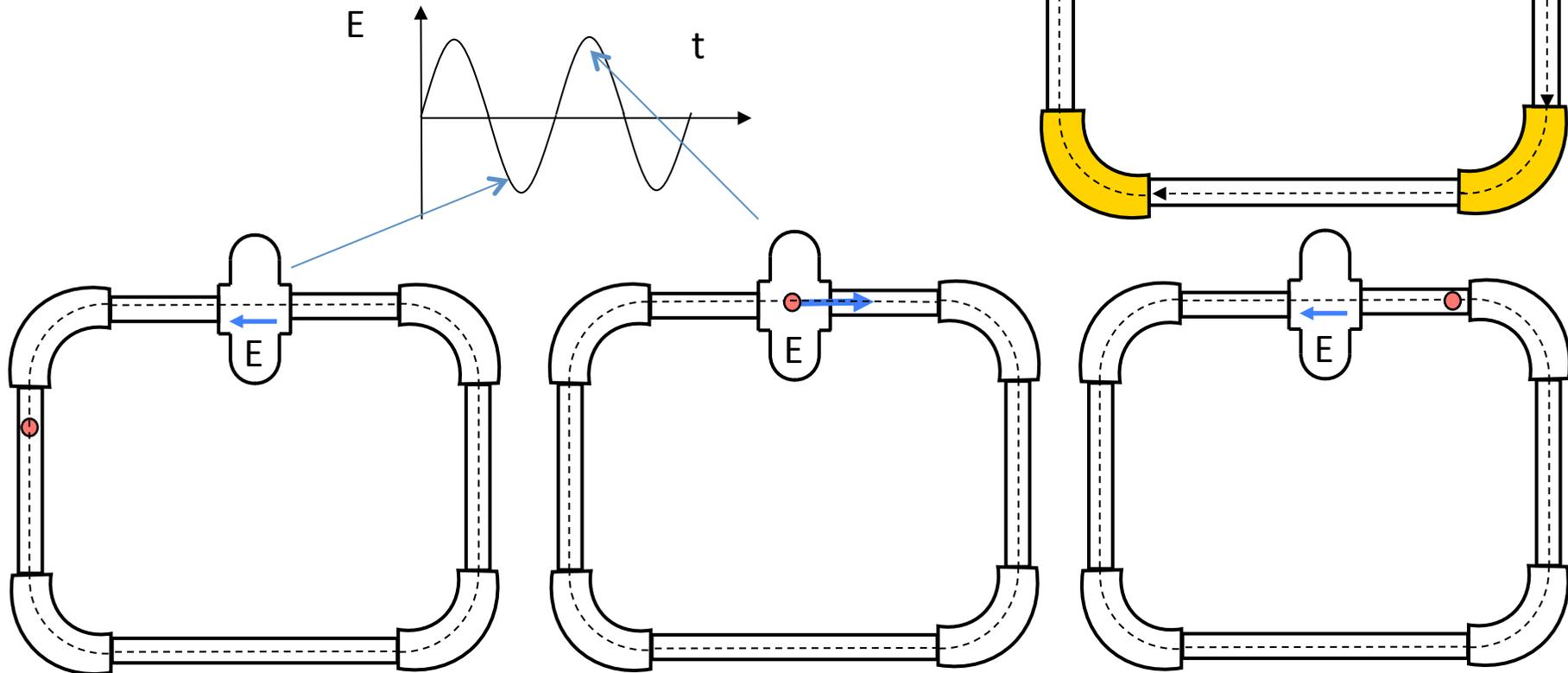
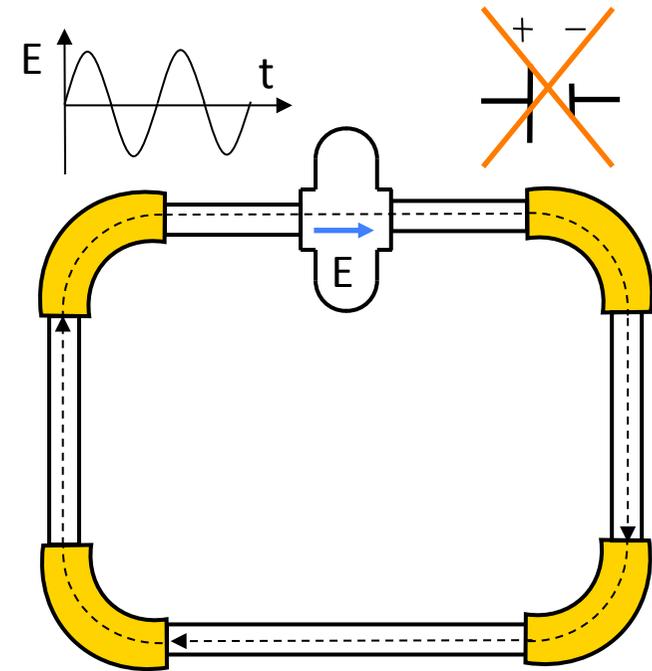
CAMERA DA VUOTO

DIAGNOSTICA

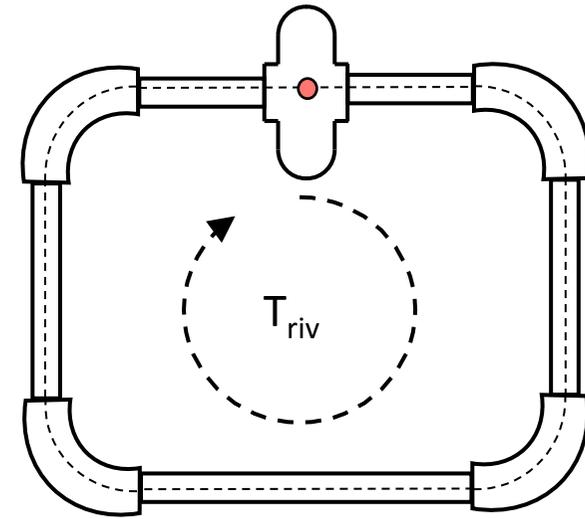
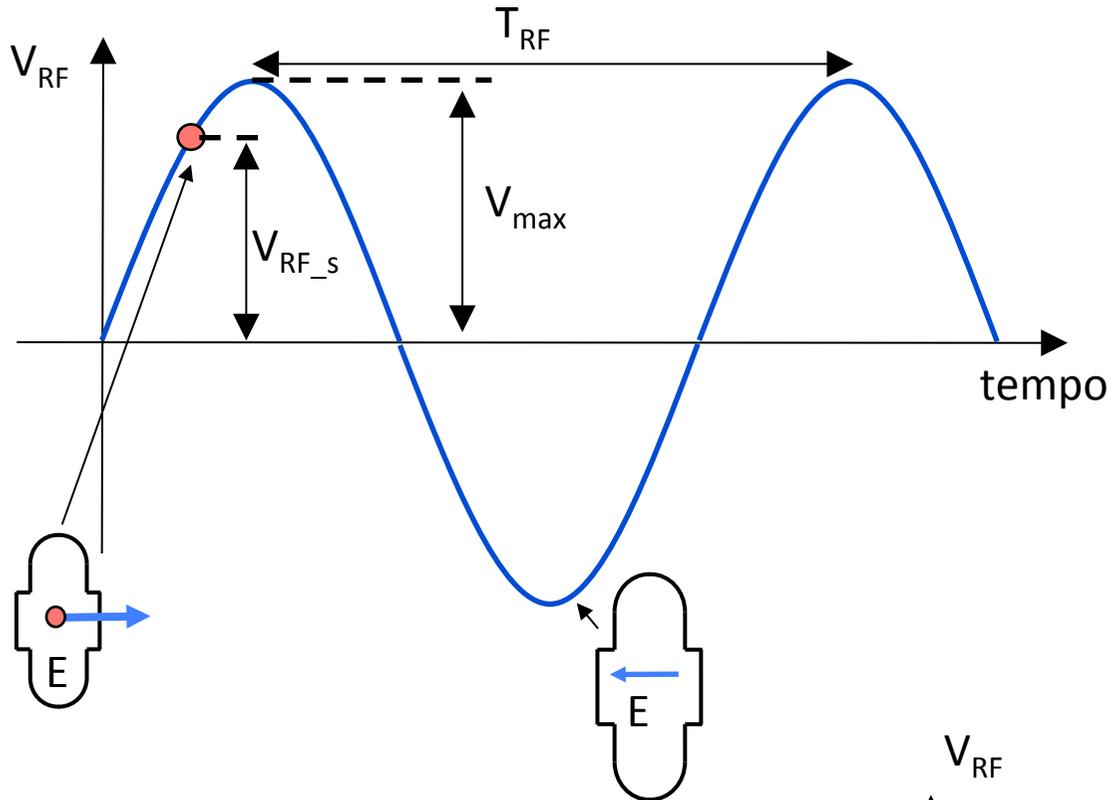


ACCELERAZIONE IN UN SINCROTRONE

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).



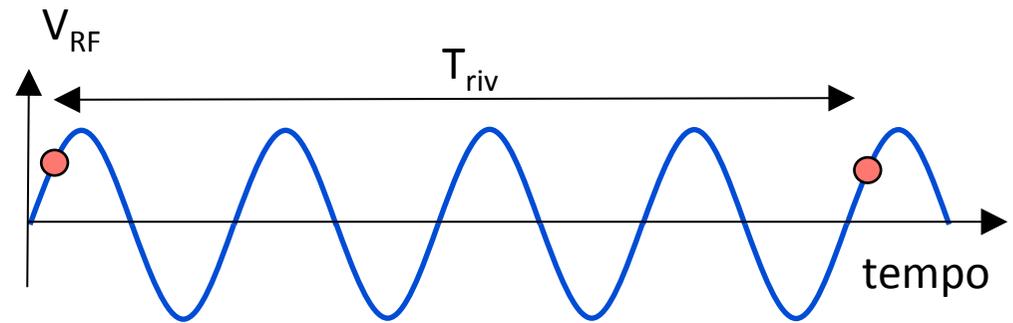
PERIODO DI RIVOLUZIONE E NUMERO ARMONICO



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

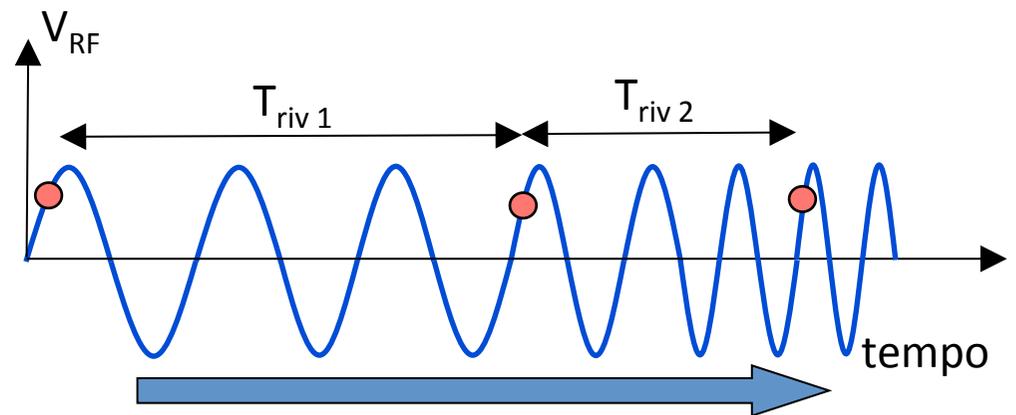
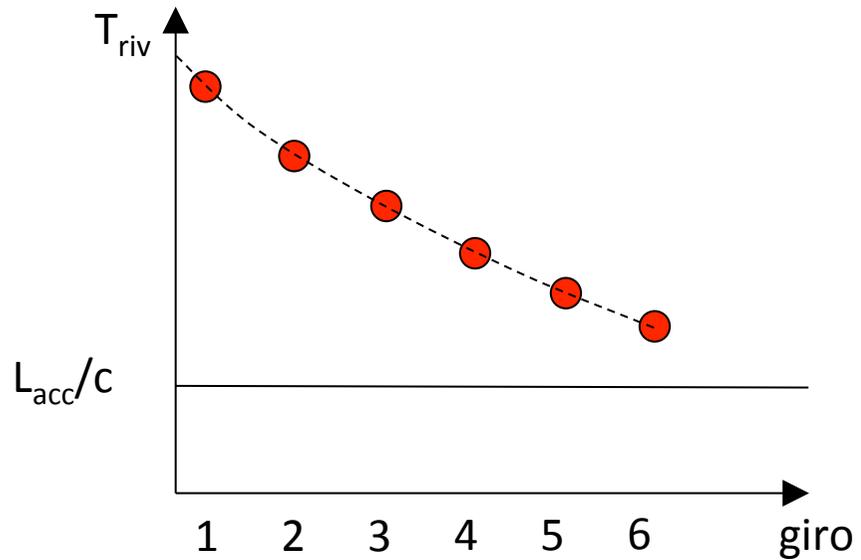
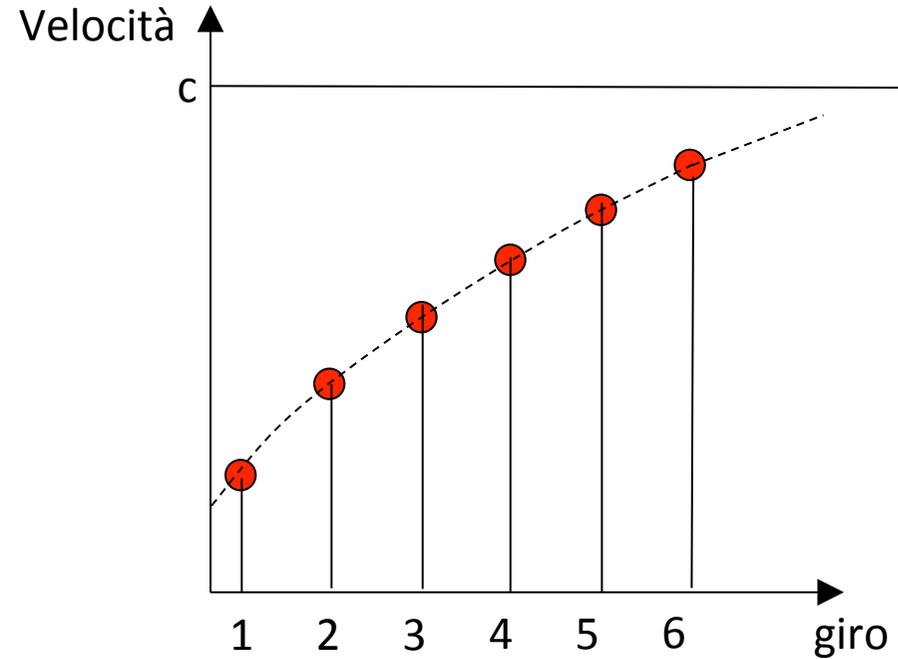
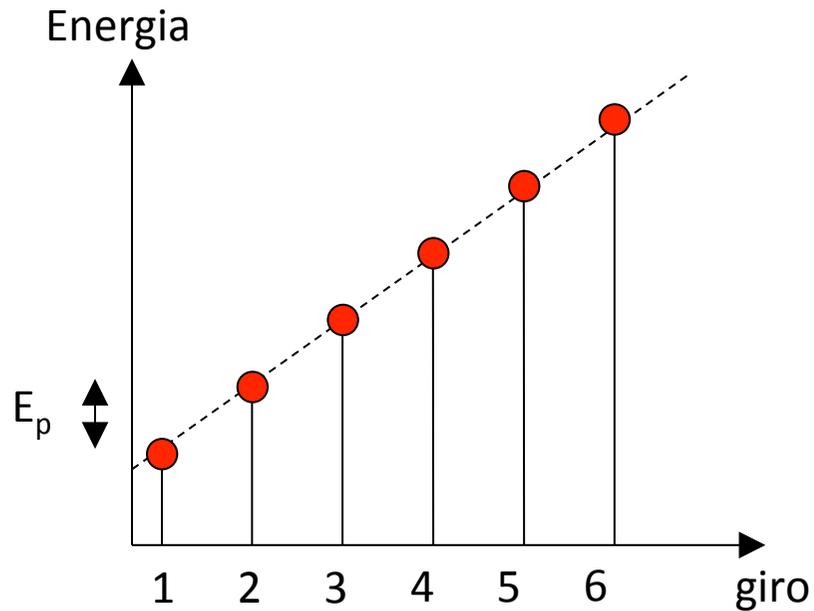
Per avere accelerazione "stabile" ovvero per fare in modo che la particella dopo un giro veda sempre la stessa tensione accelerante in cavità, il periodo di rivoluzione (T_{riv}) deve essere un multiplo intero (h) del periodo di radiofrequenza (T_{RF}) ad ogni giro.

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



$$T_{riv} = h T_{RF}$$

ACCELERAZIONE-ENERGIA-VELOCITÀ



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

LORENTZ FORCE: ACCELERATION AND FOCUSING

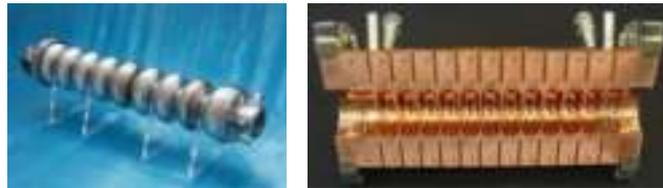
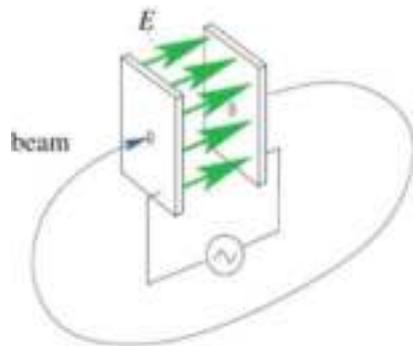
Particles are accelerated through electric field and are bended and focalized through magnetic field.
 The basic equation that describe the acceleration/bending /focusing processes is the **Lorentz Force**.

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

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

ACCELERATION

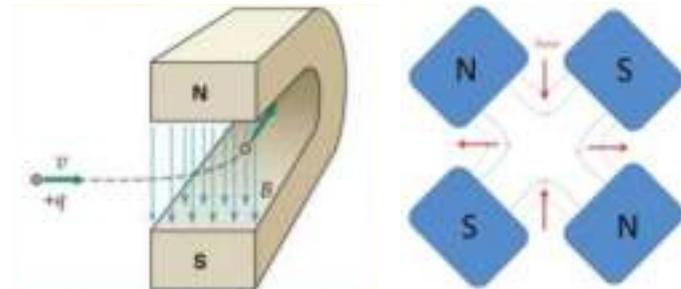
To accelerate, we need a force in the direction of motion



Longitudinal Dynamics

BENDING AND FOCUSING

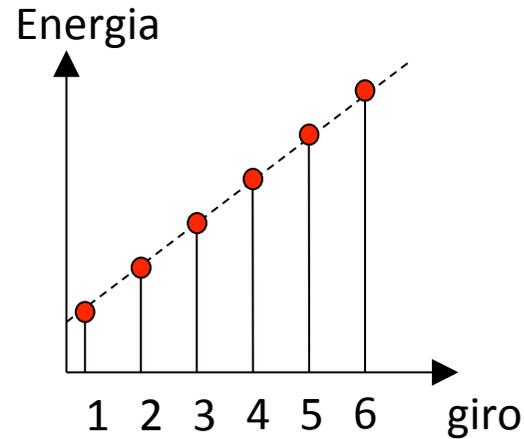
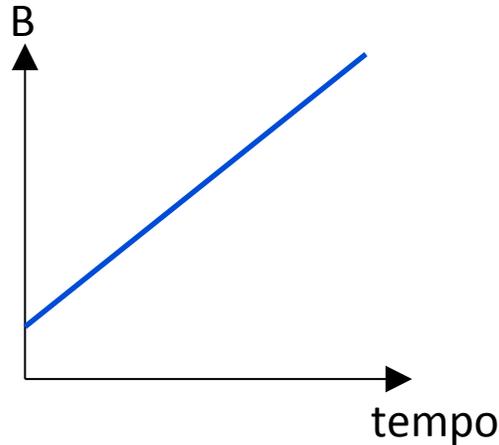
2nd term always perpendicular to motion => no energy gain



Transverse Dynamics

CAMPO MAGNETICO

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



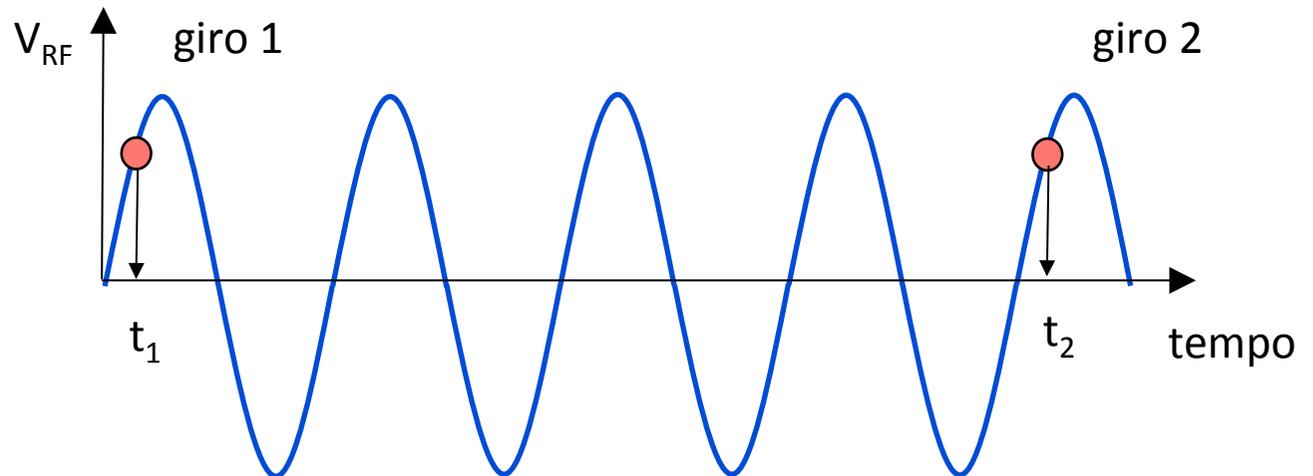
$$R \propto \frac{E_{particella}}{B}$$

Raggio di curvatura

PARTICELLA SINCRONA

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

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



PARTICELLE NON-SINCRONE

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

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

Tempo di arrivo in cavità della particella sincrona al giro n

$$t - t_s = \tau$$

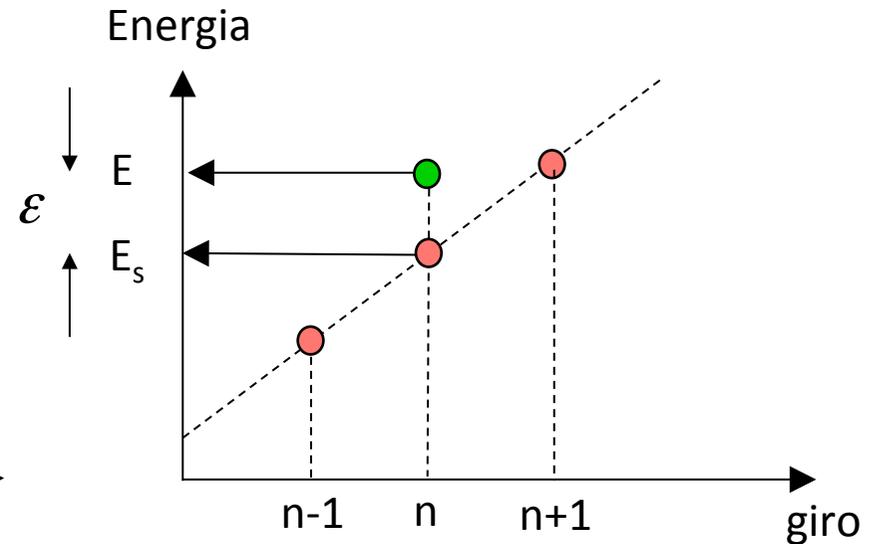
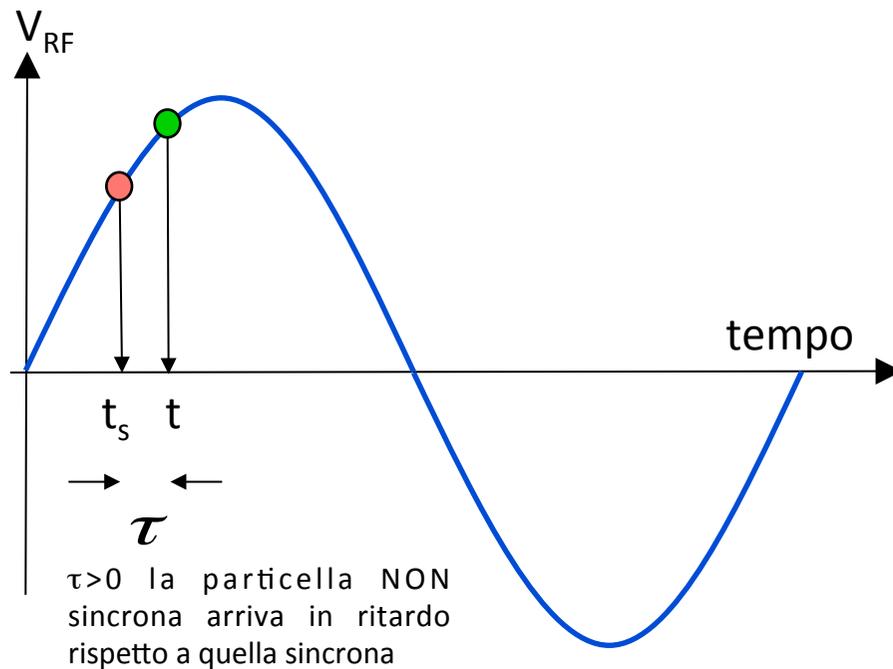
Differenza tra i due tempi di arrivo al giro n

Energia della particella NON sincrona al giro n

Energia della particella sincrona al giro n

Differenza tra le due energie al giro n

$$E - E_s = \varepsilon$$



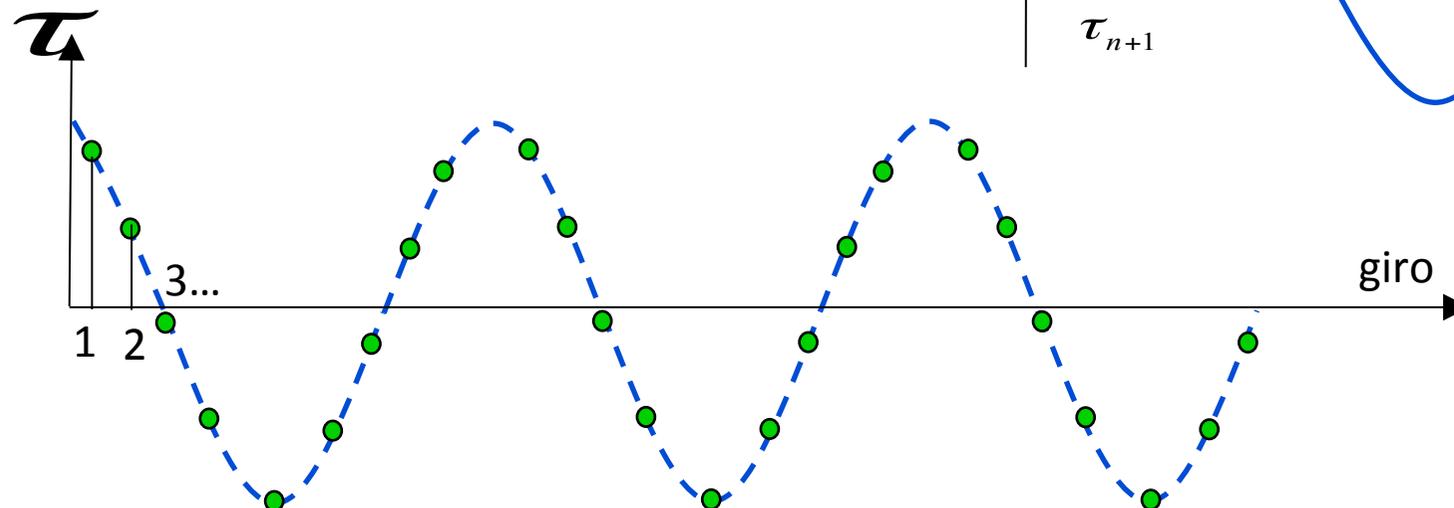
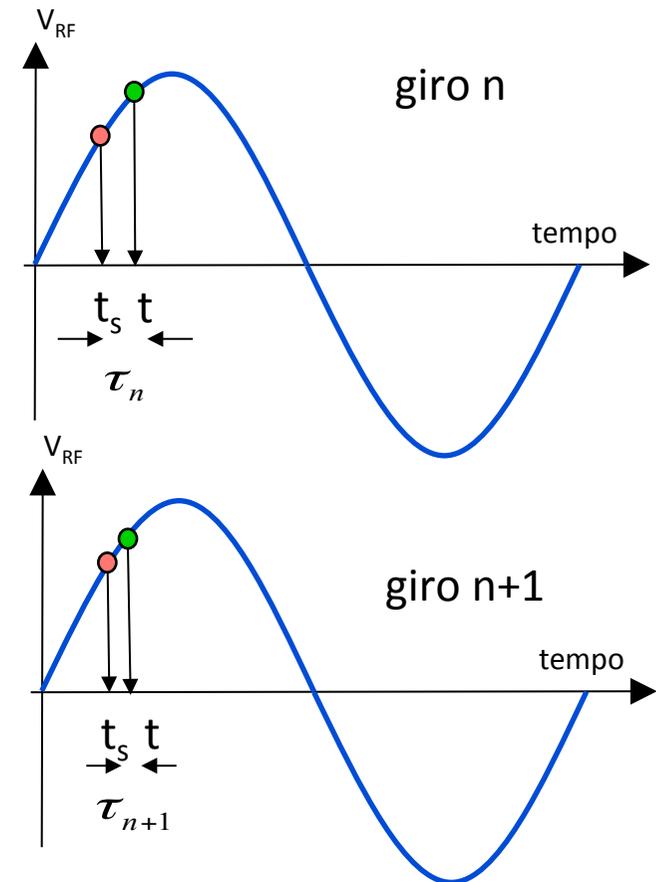
OSCILLAZIONI DI SINCROTRONE

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

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

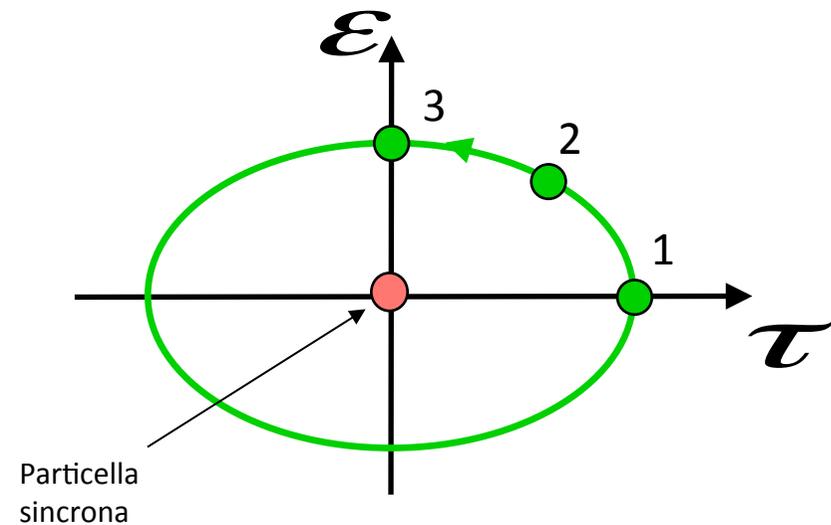
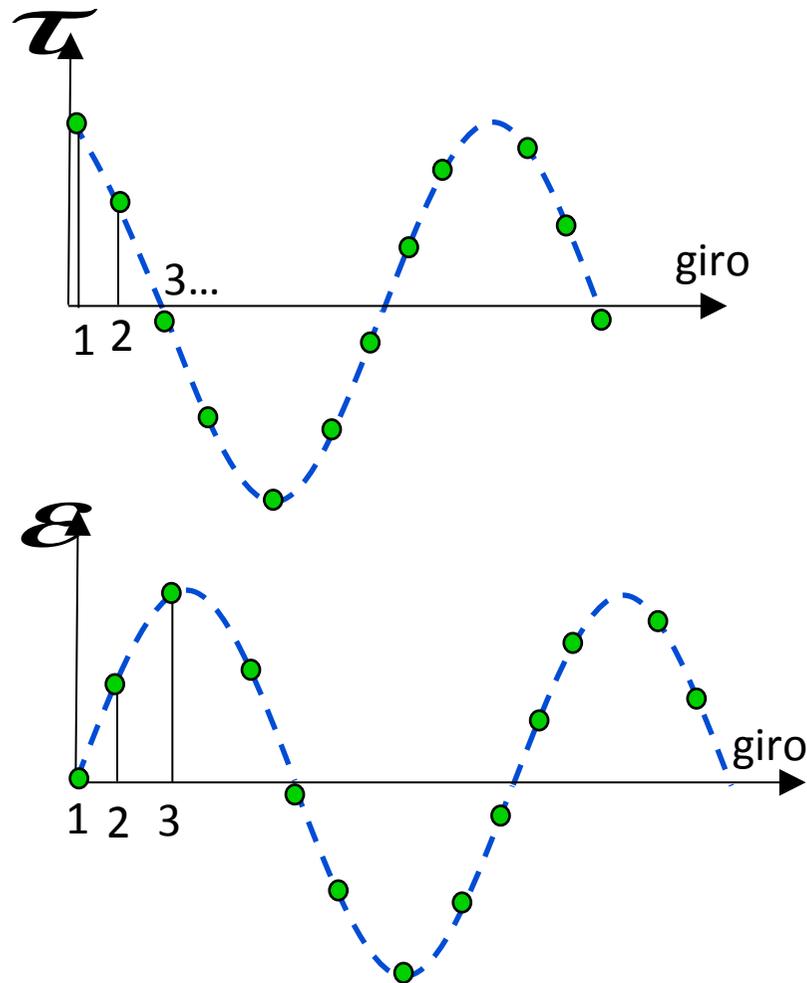
A questa maggiore accelerazione corrisponde un aumento di velocità e, quindi, al giro successivo la particella NON sincrona avrà **recuperato parte del suo "svantaggio"** rispetto a quella sincrona e si troverà più vicina. Viceversa se una particella arriva prima della particella sincrona in cavità vede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

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



OSCILLAZIONI DI SINCROTRONE NELLO SPAZIO DELLE FASI

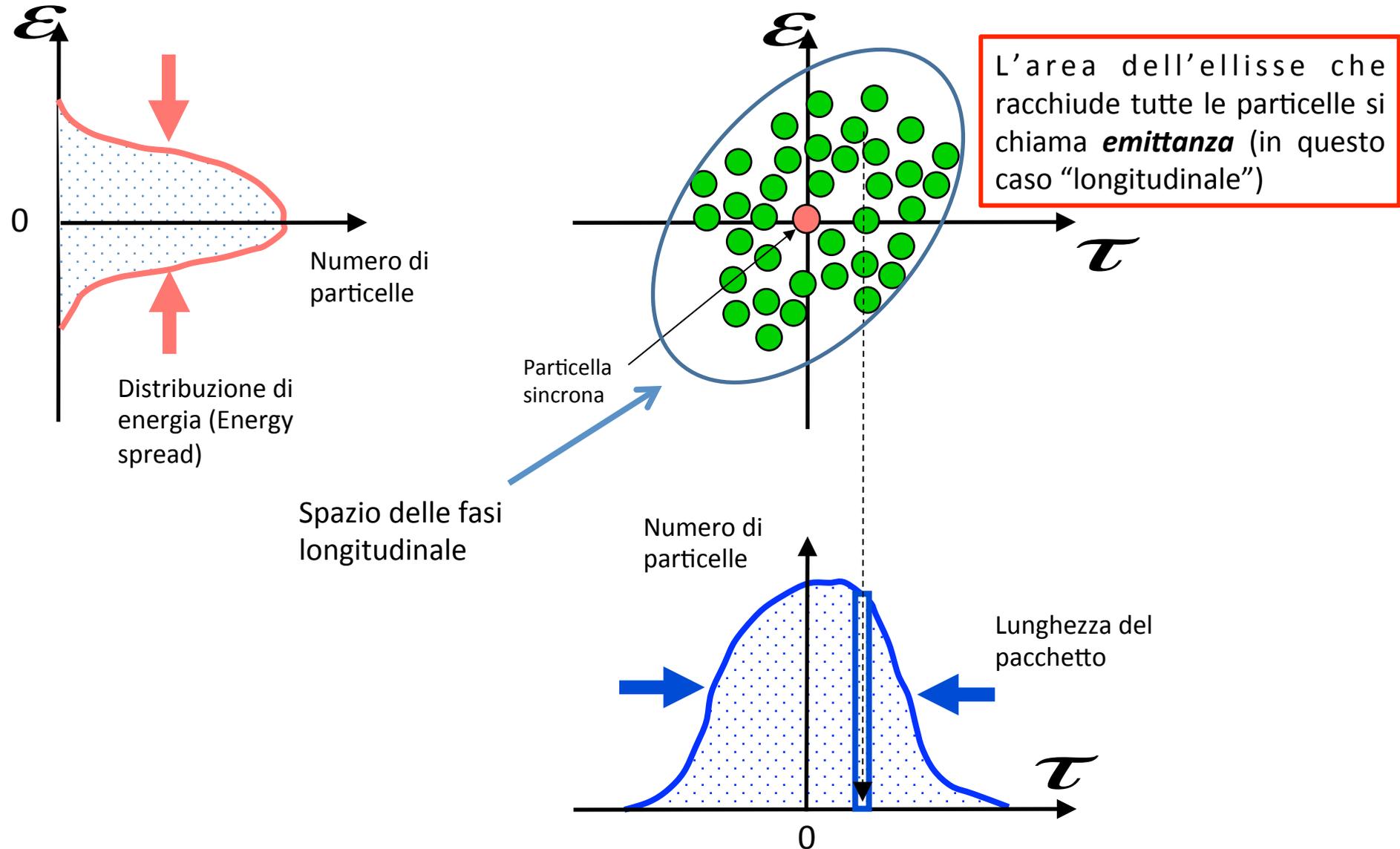
Alle oscillazioni in posizione attorno alla particella sincrona corrispondono oscillazioni in energia.



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

LUNGHEZZA DEL PACCHETTO DI PARTICELLE

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



LORENTZ FORCE: ACCELERATION AND FOCUSING

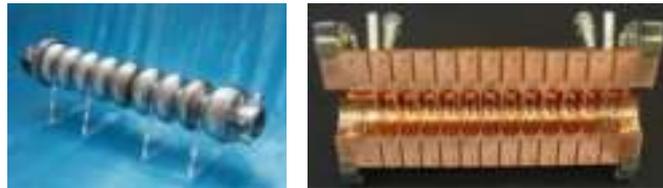
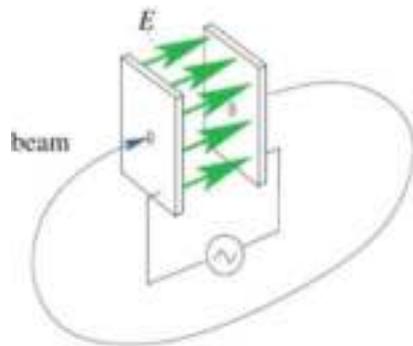
Particles are accelerated through electric field and are bended and focalized through magnetic field. The basic equation that describe the acceleration/bending /focusing processes is the **Lorentz Force**.

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

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

ACCELERATION

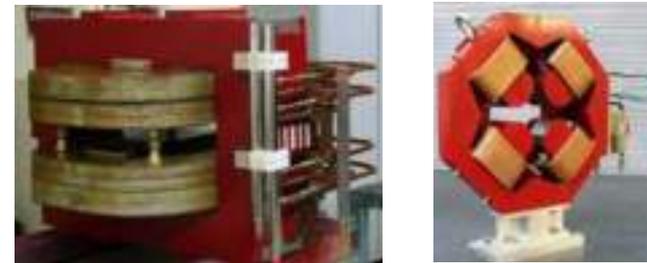
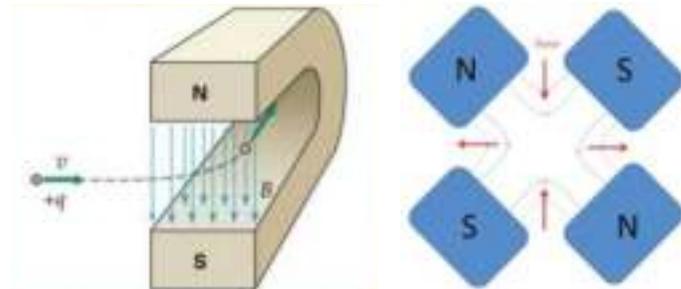
To accelerate, we need a force in the direction of motion



Longitudinal Dynamics

BENDING AND FOCUSING

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

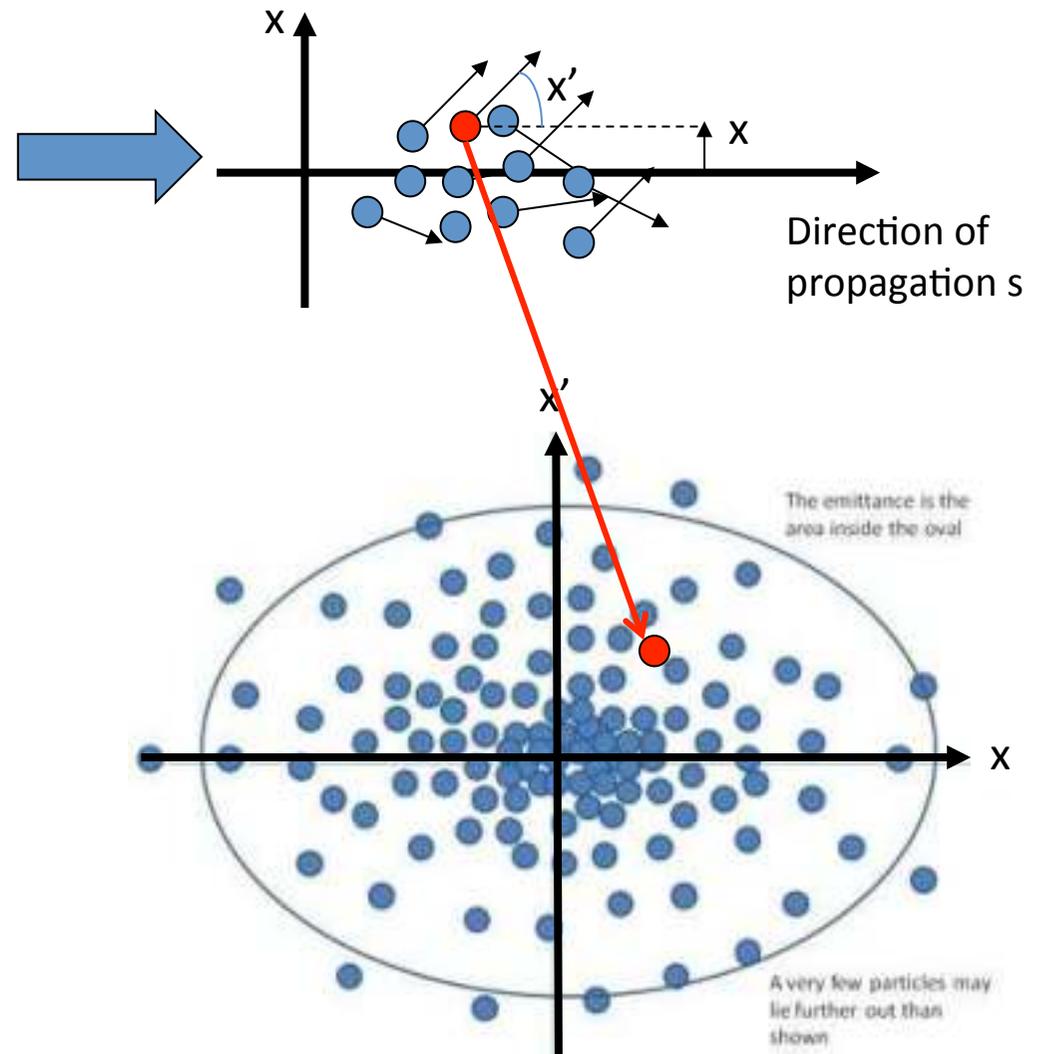
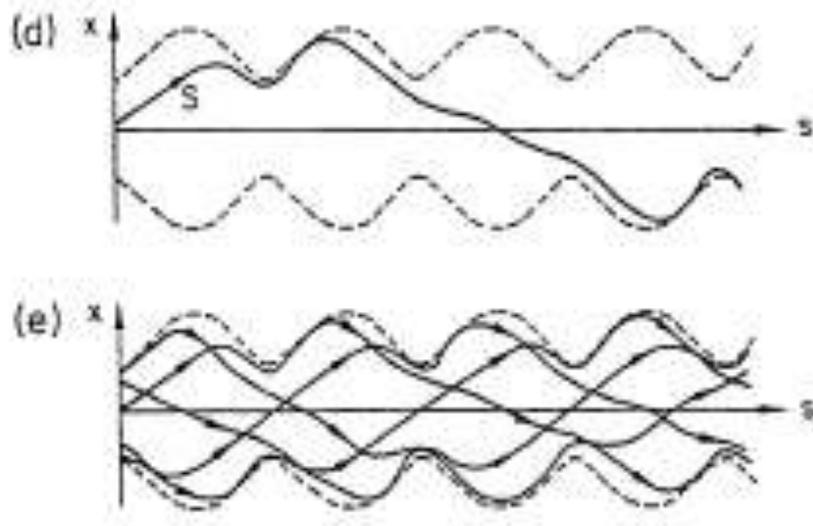


Transverse Dynamics

TRANSVERSE PHASE SPACE AND EMITTANCE

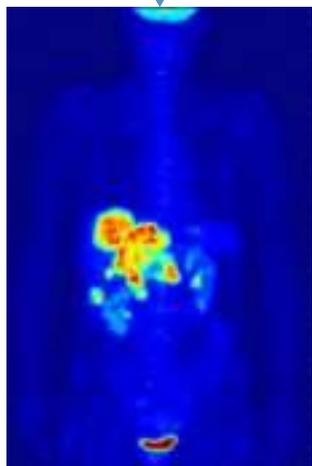
Similarly to what we have in the longitudinal plane also in the transverse plane the particles perform oscillations (called **betatron oscillations**) due to the force provided by quadrupoles.

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



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

A COSA SERVONO GLI ACCELERATORI DI PARTICELLE?



Produzione di radioisotopi



sicurezza



sterilizzazione



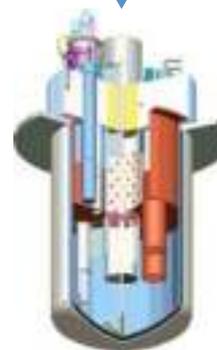
Radioterapia e Adroterapia



Impiantazione ionica



Trattamento materiali



Reattori a fissione controllati



Studi di materiali per fusione nucleare



Produzione di raggi X e γ per fisica della materia



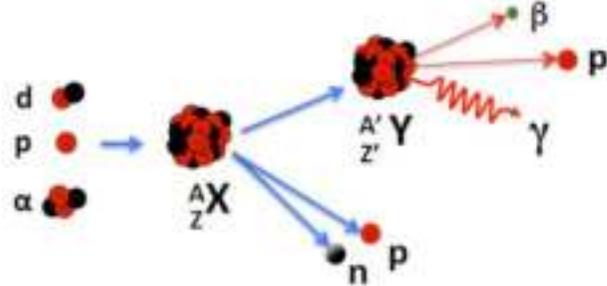
Sorgenti di neutroni



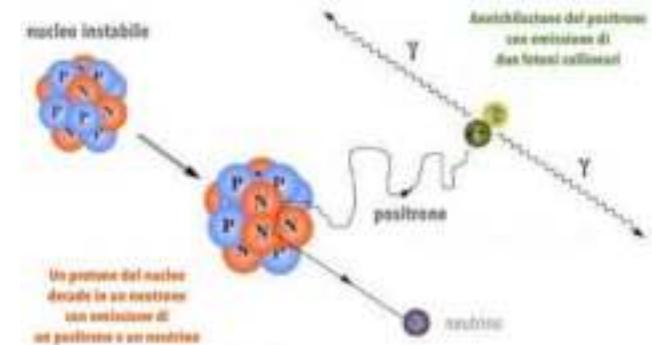
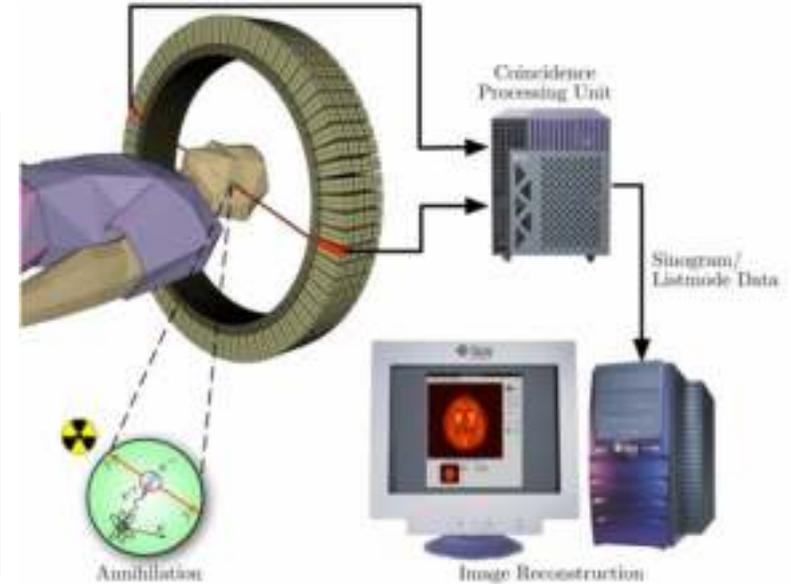
Fisica delle alte energie

APPLICAZIONI MEDICHE: PRODUZIONE DI RADIOISOTOPI

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

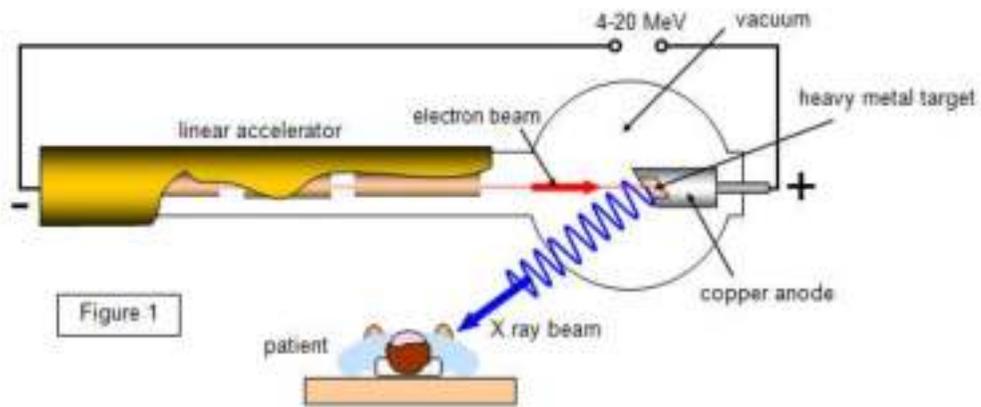


PET: diagnostica medica (oncologica)



APPLICAZIONI MEDICHE: RADIOTERAPIA

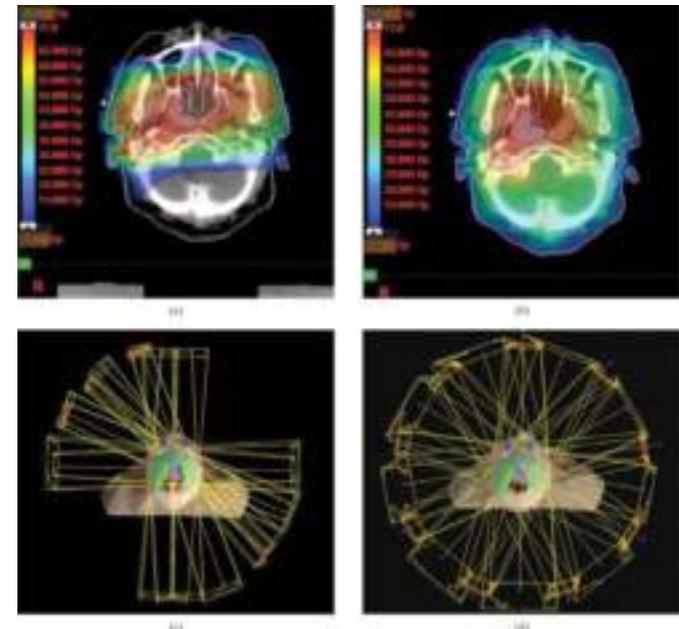
Si irradiano le masse tumorali con fasci di **raggi X** o **elettroni**



Foglio metallico per la produzione di raggi x

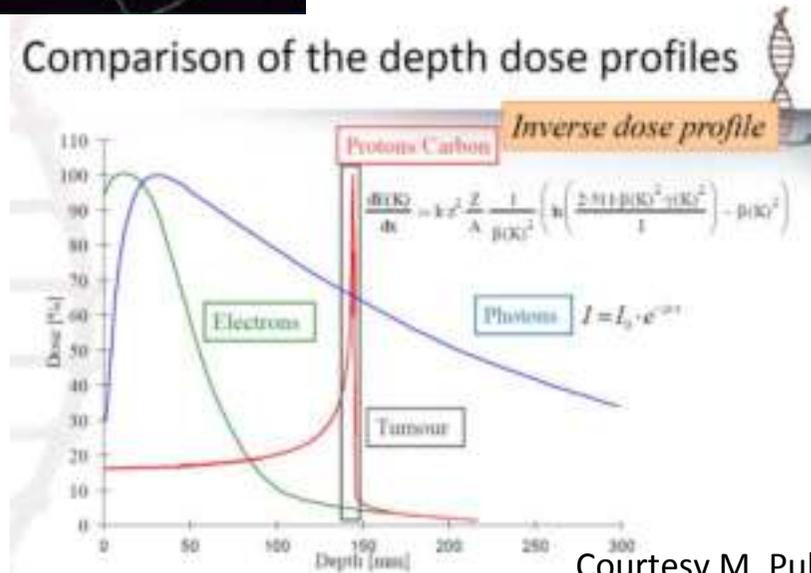
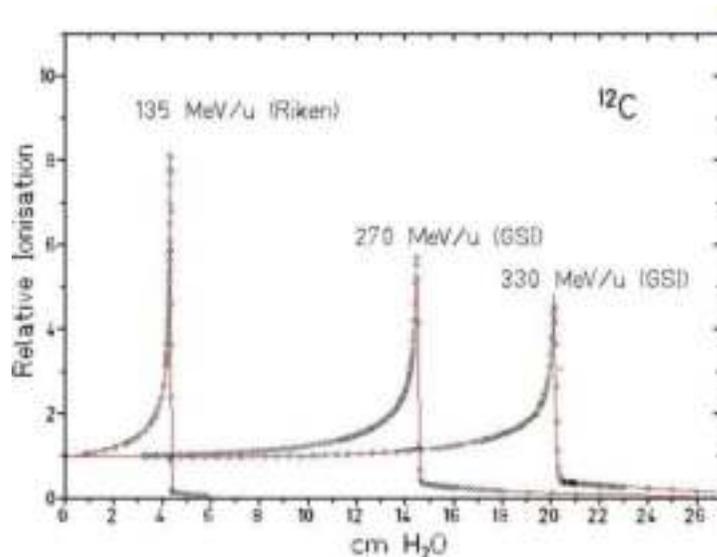
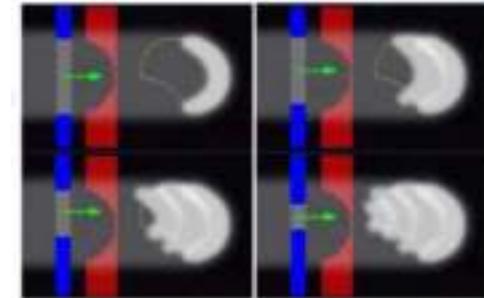
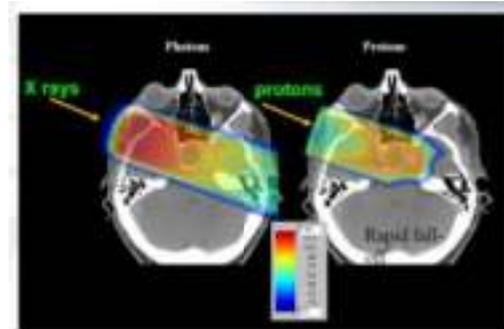
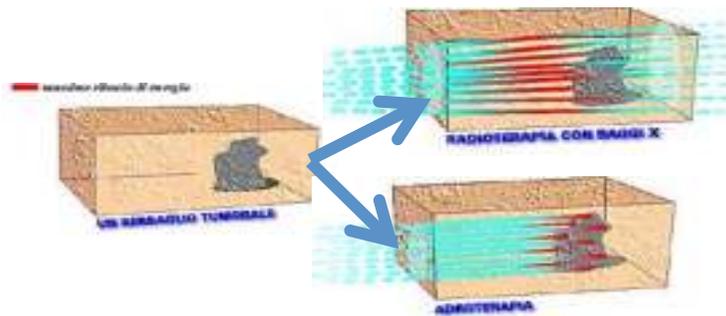
LINAC

Sistema di collimazione



APPLICAZIONI MEDICHE: ADROTERAPIA

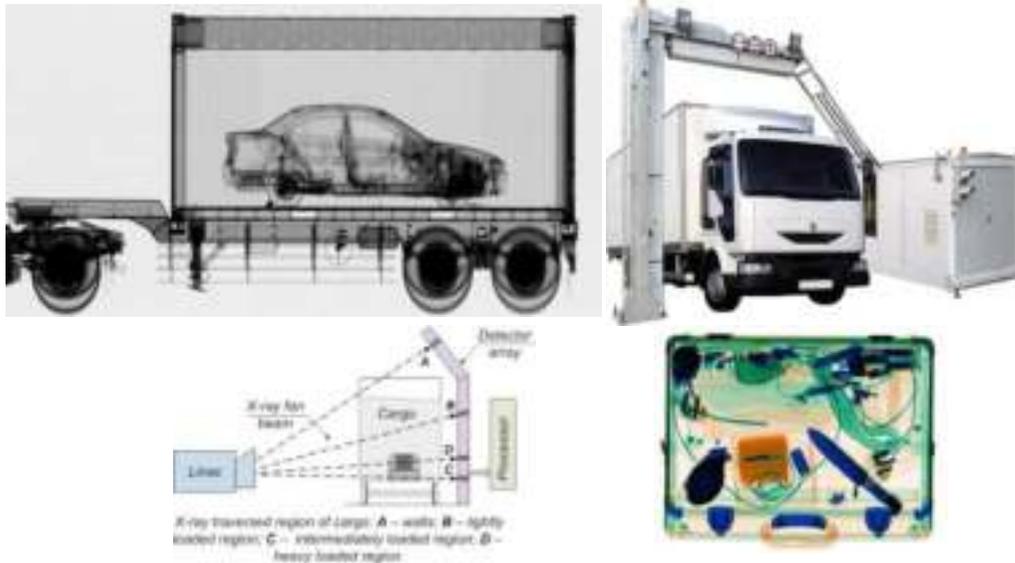
Terapia antitumorale basata sull'irraggiamento con protoni e ioni pesanti (C).
 E' più efficace e più localizzata (risonanza di Bragg) rispetto a quella basata su elettroni o raggi X
 Centri in funzione: CNAO a Pavia, PSI a Zurigo, Loma Linda in California, Giappone,...



Courtesy M. Pullia

APPLICAZIONI INDUSTRIALI

Cargo Scan con raggi X



Trattamento di materiali polimerici: cross-linking

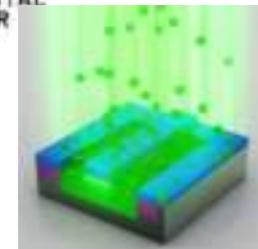
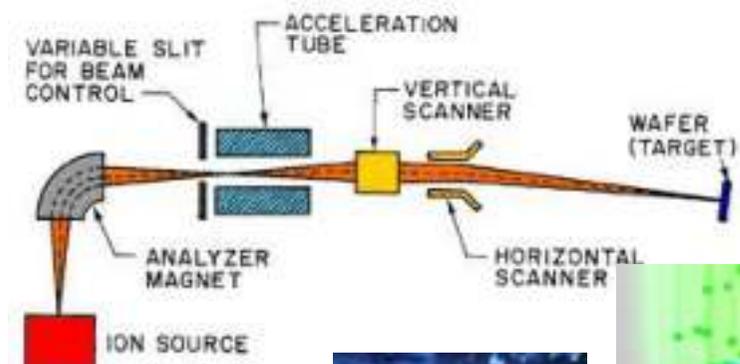
Tali trattamenti industriali aumentano le performances dei materiali in termini di resistenza al calore, elasticità, etc...



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



Impiantazione ionica (semiconduttori)

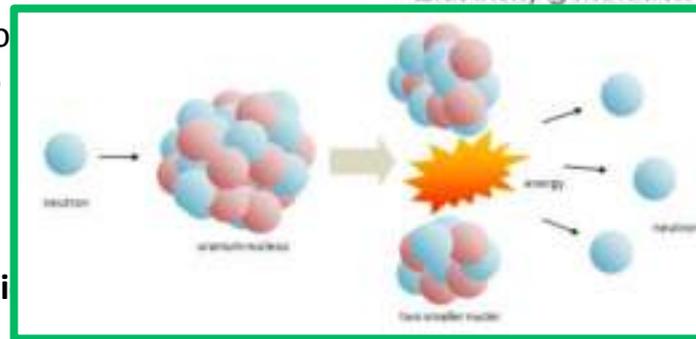
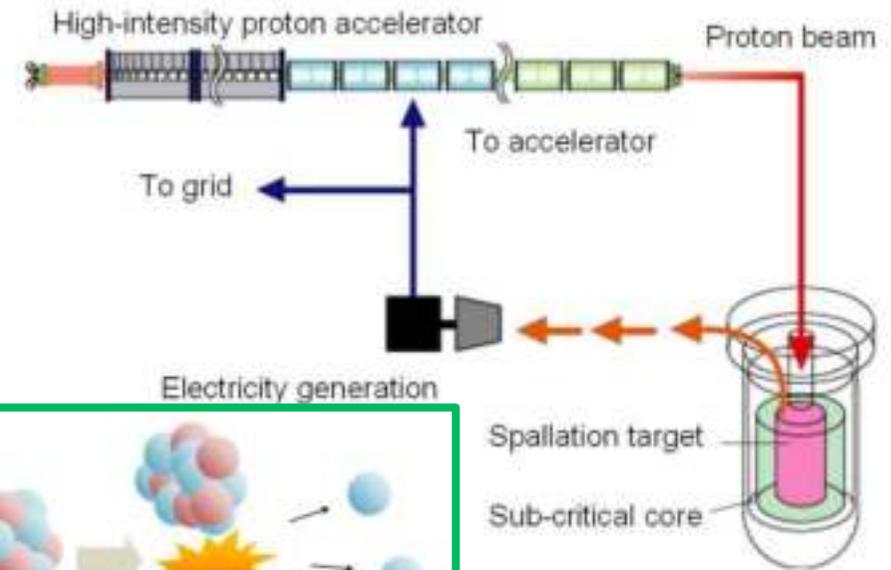


PRODUZIONE DI ENERGIA CON ACCELERATORI

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

Vantaggi:

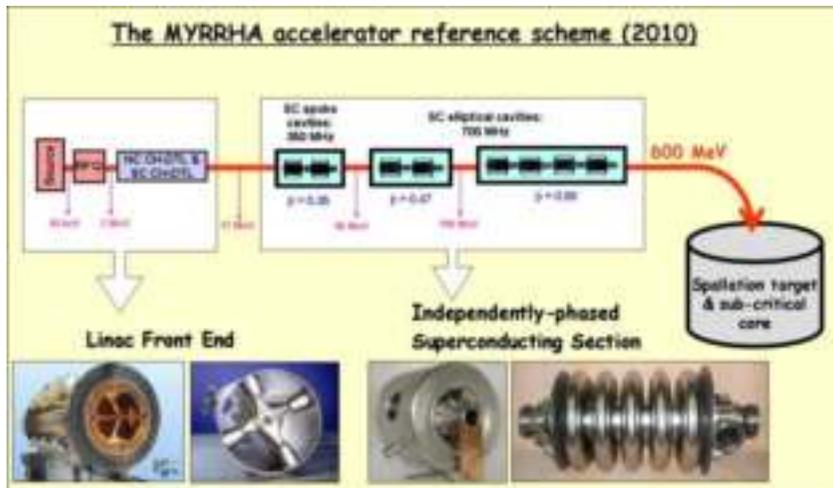
- Utilizza **torio come combustibile**, molto abbondante dell'uranio e del plutonio
- breve vita dei prodotti di scarto** (dell'ordine dei 100 anni contro le centinaia di migliaia di anni dei reattori attuali).
- reattore intrinsecamente sicuro** (fissi controllata)



Proceedings of Linear Accelerator Conference LINAC2018, Tsukuba, Japan

PROTON LINAC FOR ADS APPLICATION IN CHINA

Shimian Fu, Shouxiang Fang, Jiaqing Wang
 IHEP, Institute of High Energy Physics, Beijing 100049, China
 Xialing Guan
 CIAE, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China

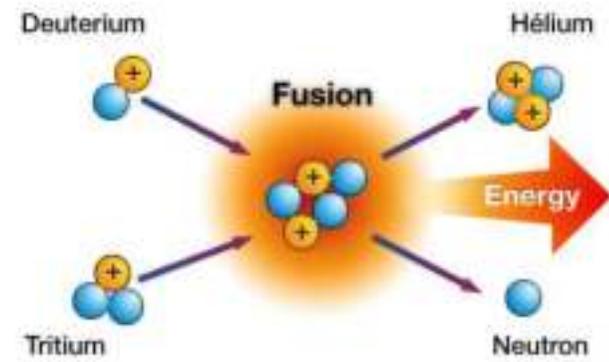


Alcuni esperimenti di laboratorio e molti studi teorici hanno dimostrato la possibilità teorica di tale impianto. **Carlo Rubbia**, è stato uno dei primi a concepire un progetto di un reattore subcritico, il cosiddetto "**amplificatore di energia**".

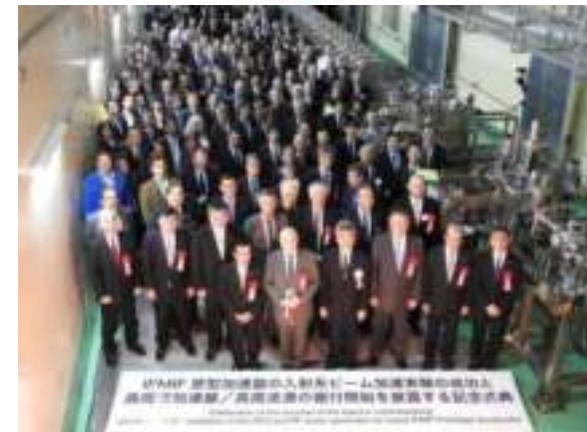
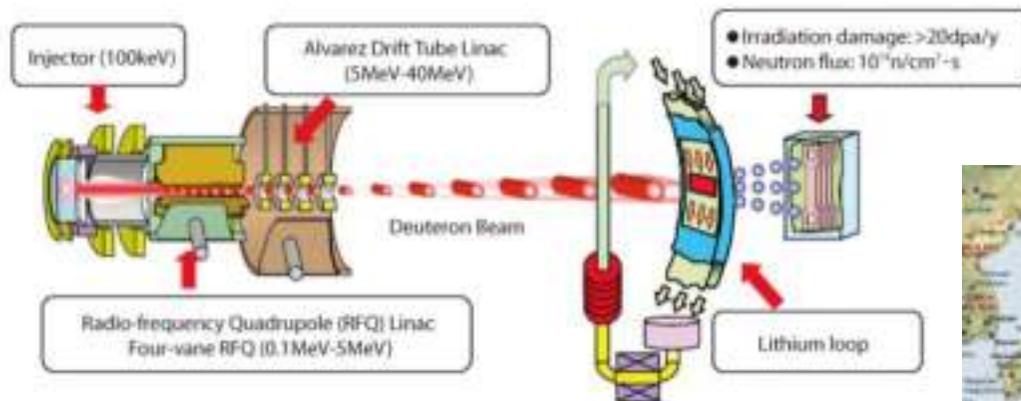
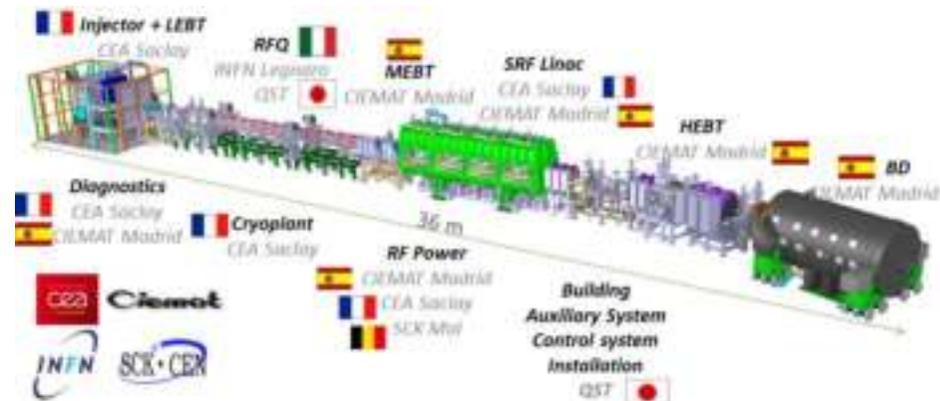
Nel 2012 gli scienziati e gli ingegneri del CERN hanno lanciato l'International Thorium Energy Committee (iThEC) un'organizzazione dedicata a perseguire questo obiettivo.

TEST DI MATERIALI PER REATTORI A FUSIONE NUCLEARE

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

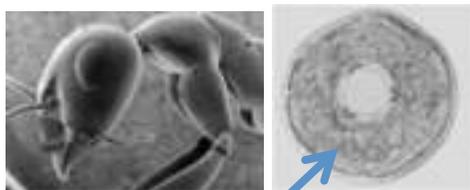


L'**International Fusion Materials Irradiation Facility (IFMIF)**, è un **impianto di test di materiali** utilizzabili in un reattore di fusione. E' una **sorgente di neutroni** basata sul un acceleratore di deuterio che collidendo contro atomi di **litio** produce un flusso di neutroni analogo a quello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



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

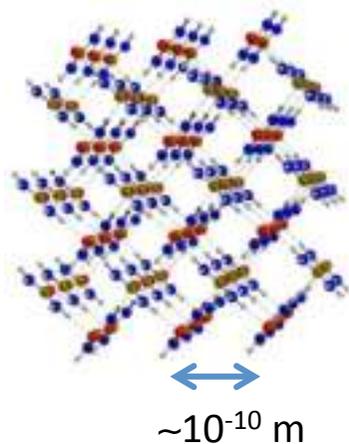
Luce visibile:
400-700 nm ($\sim 10^{-7}$ m)



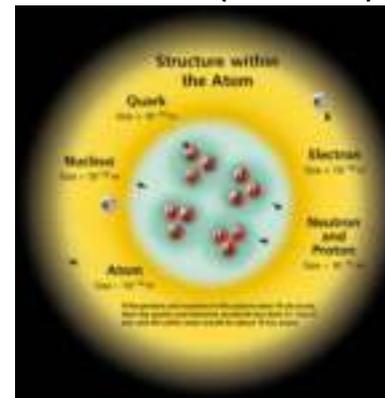
1-10 μm

Risoluzione 200 nm

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



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



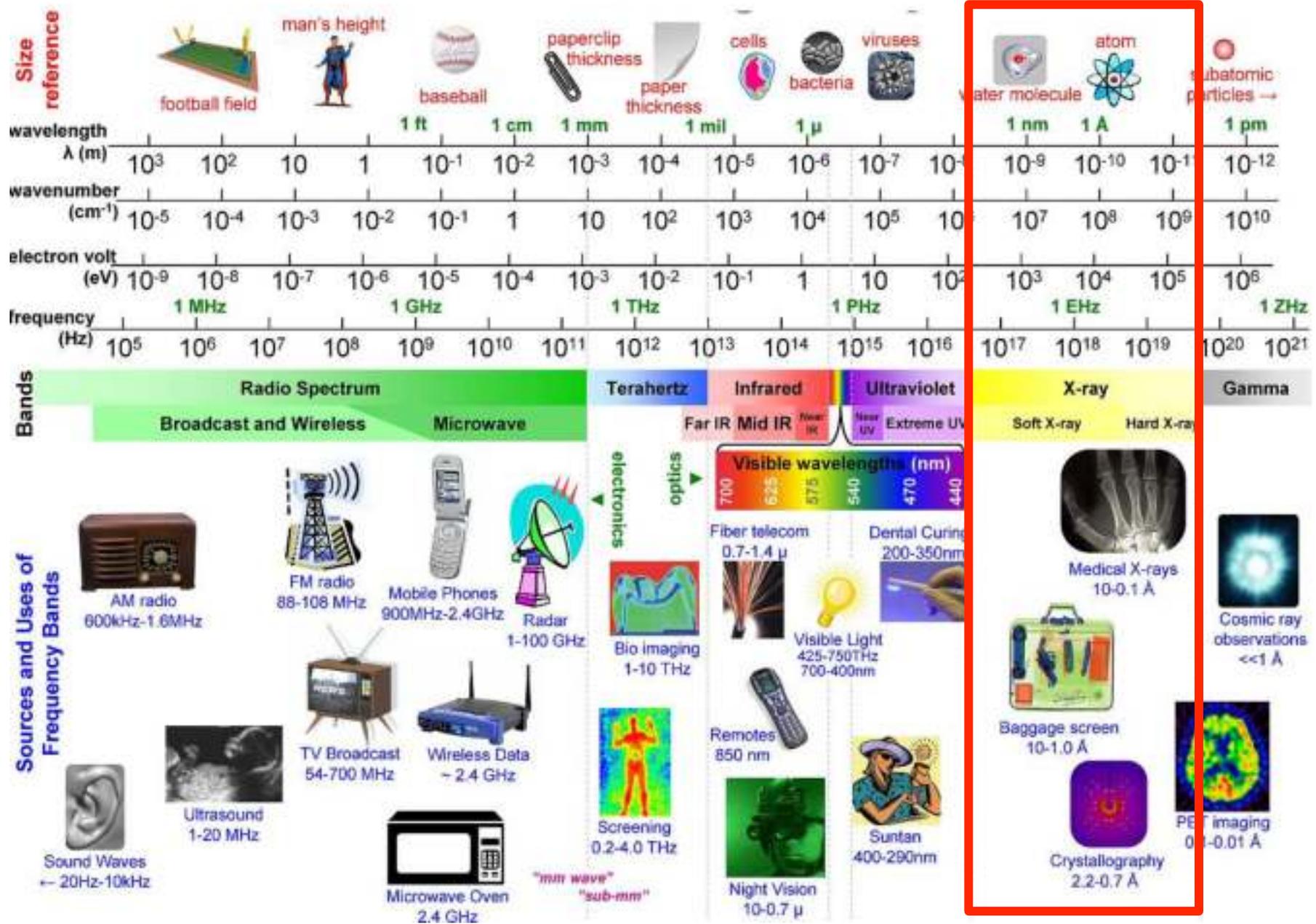
$$\lambda = h/p$$



FOTONI

PARTICELLE IN GENERALE

LUCE A DIVERSA LUNGHEZZA D'ONDA: RAGGI X

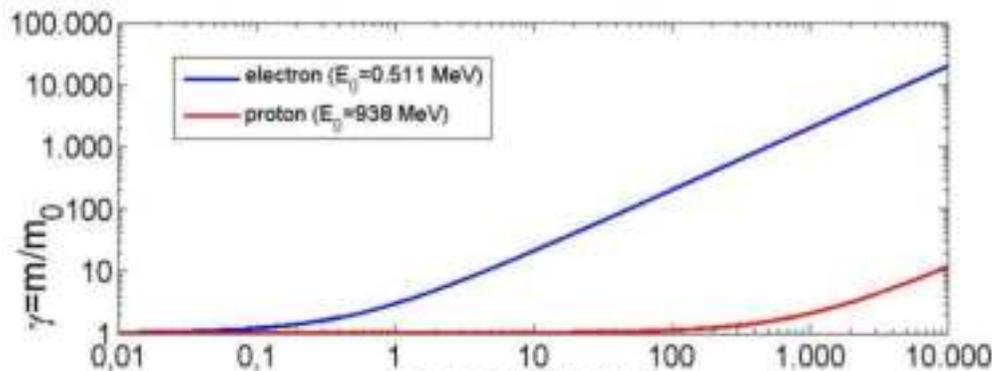
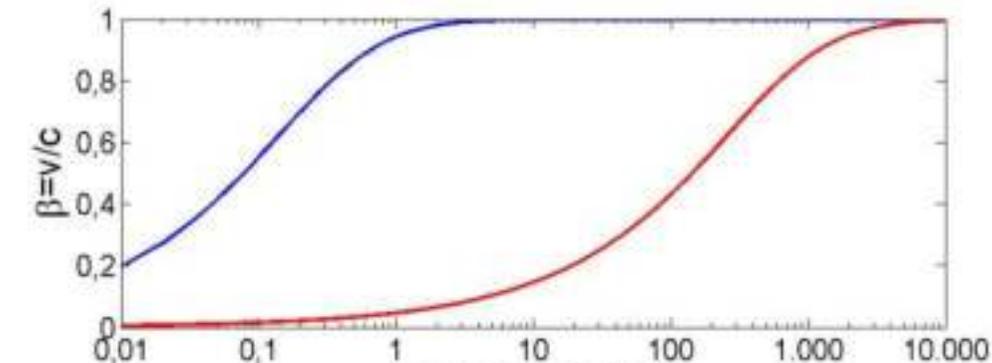
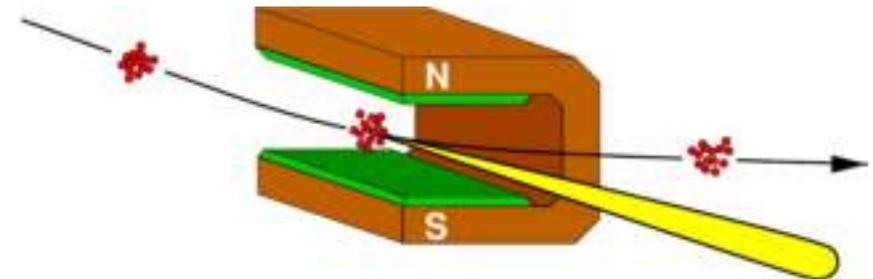
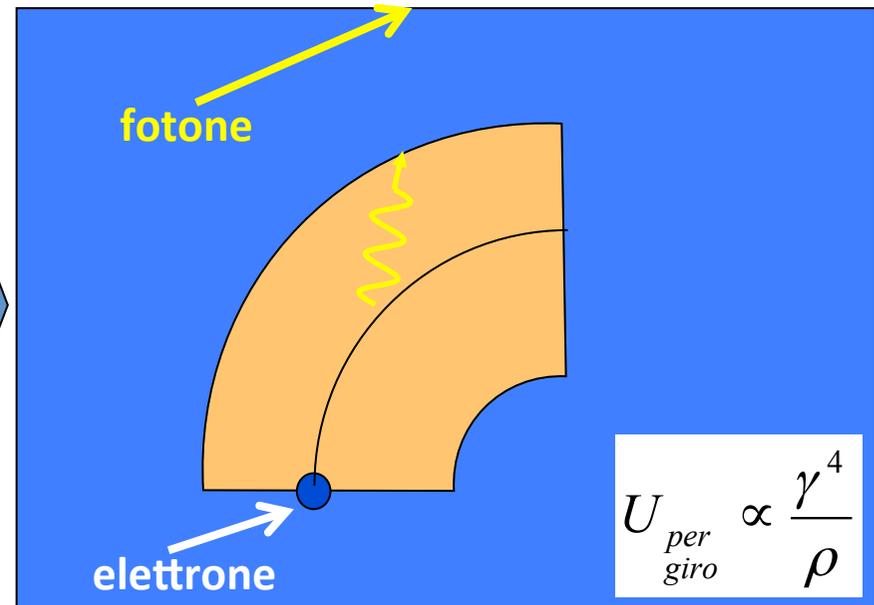


LE PARTICELLE IN MOVIMENTO POSSONO EMETTERE RAGGI X?

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

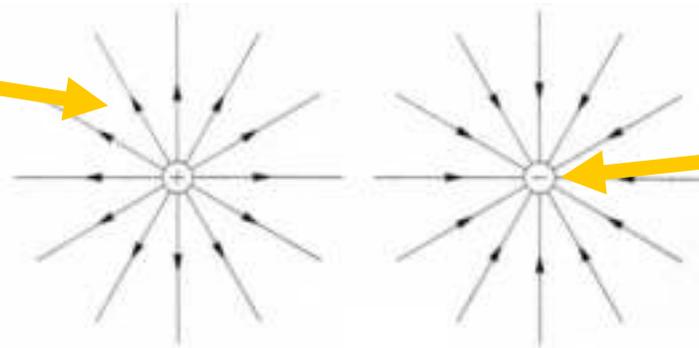
Tale fenomeno è tanto più accentuato quanto più la particella è relativistica ($\gamma > 1$) ovvero si muove a **velocità prossime a quella della luce**.

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

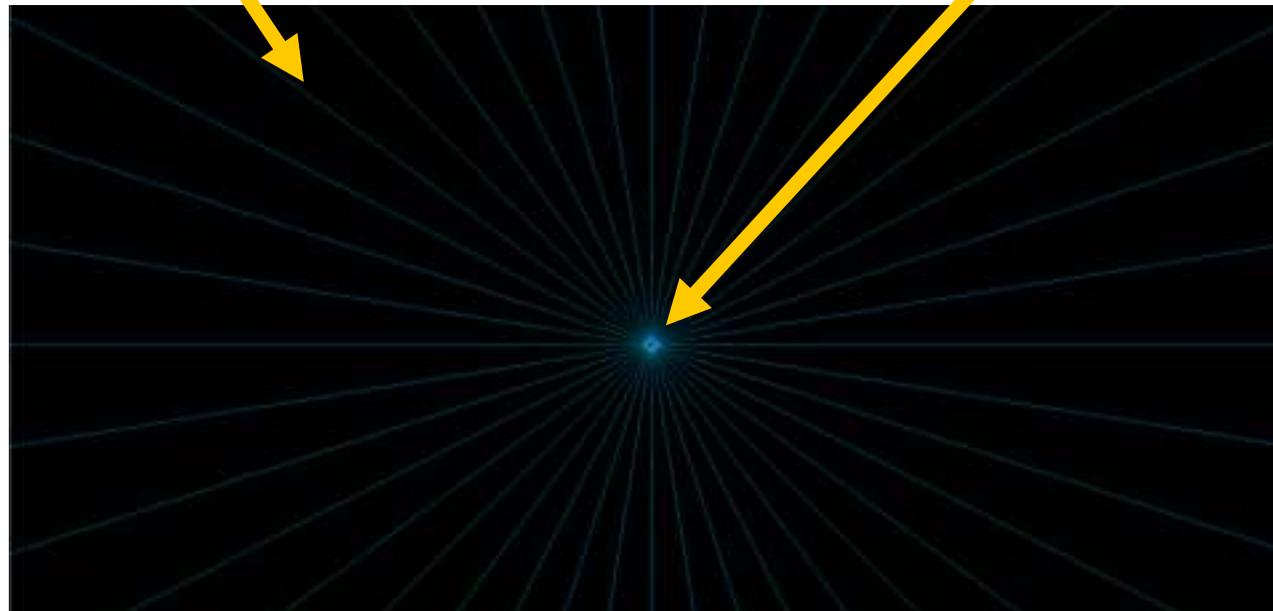


RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE

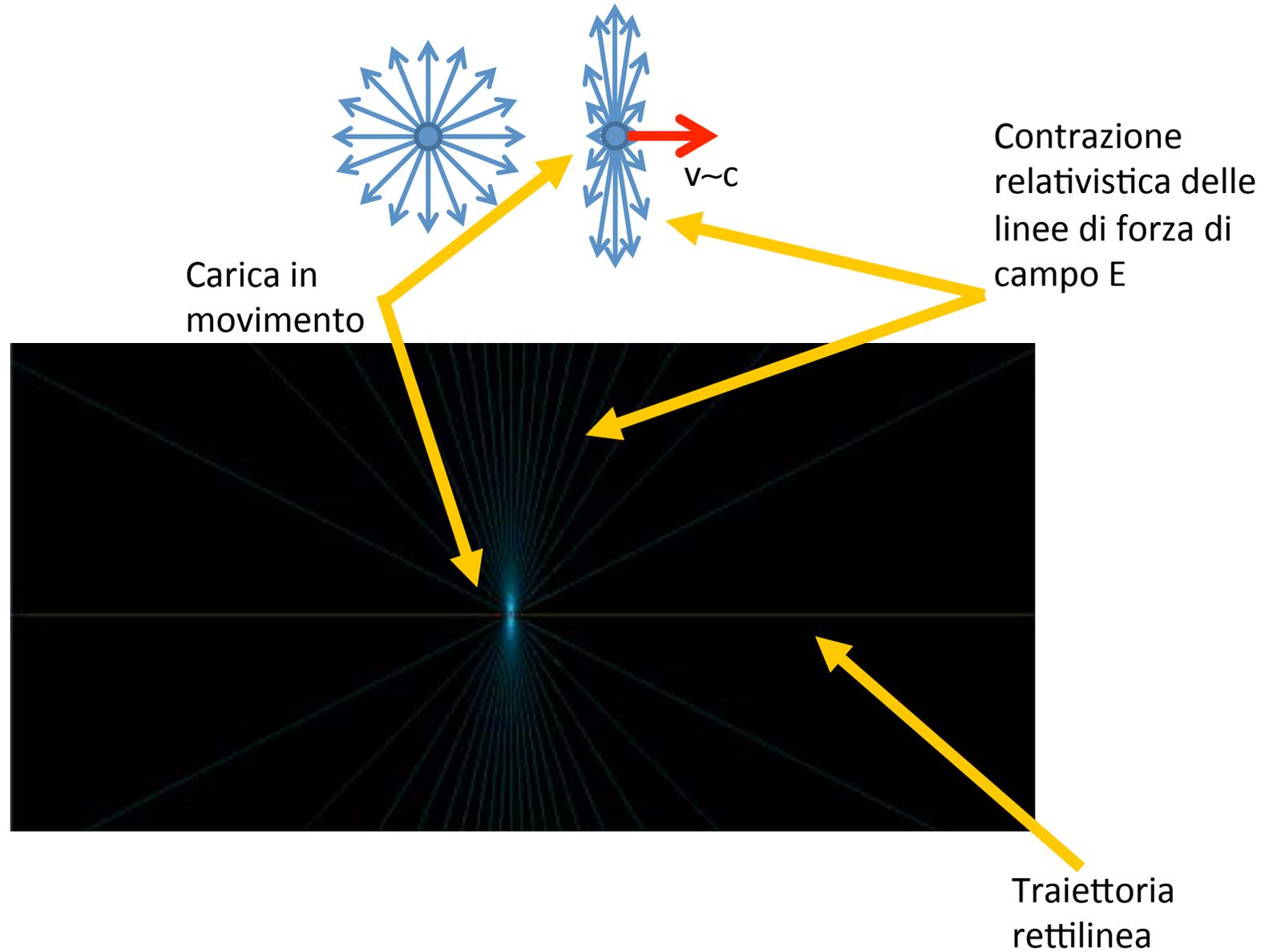
Campo elettrico



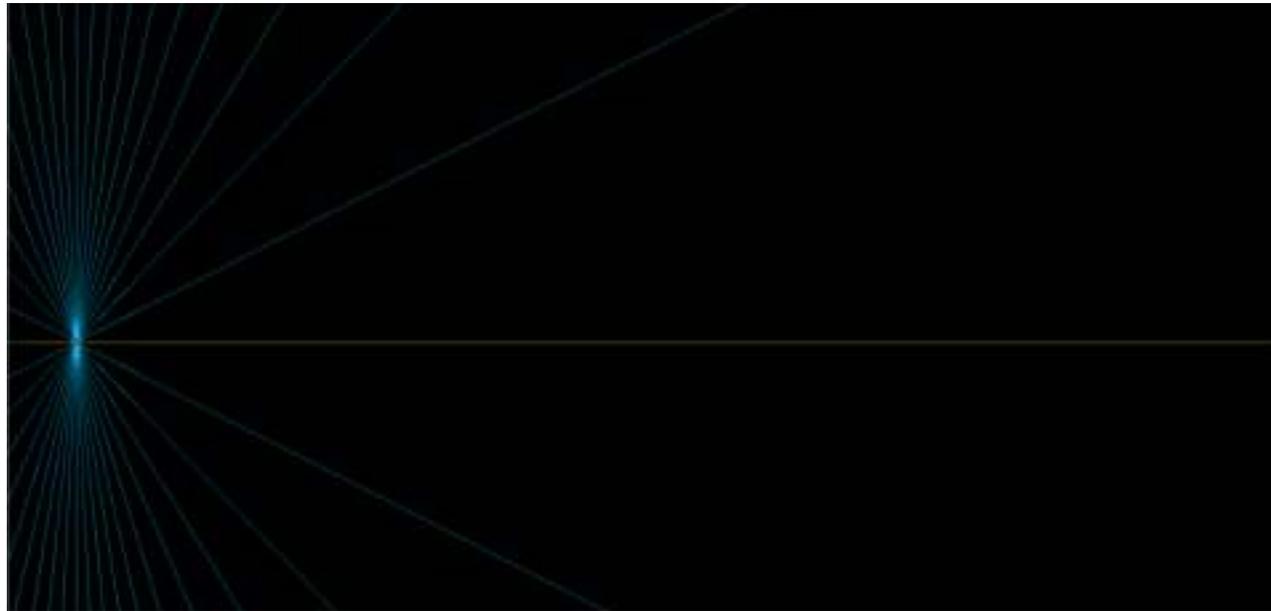
Carica ferma



RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE



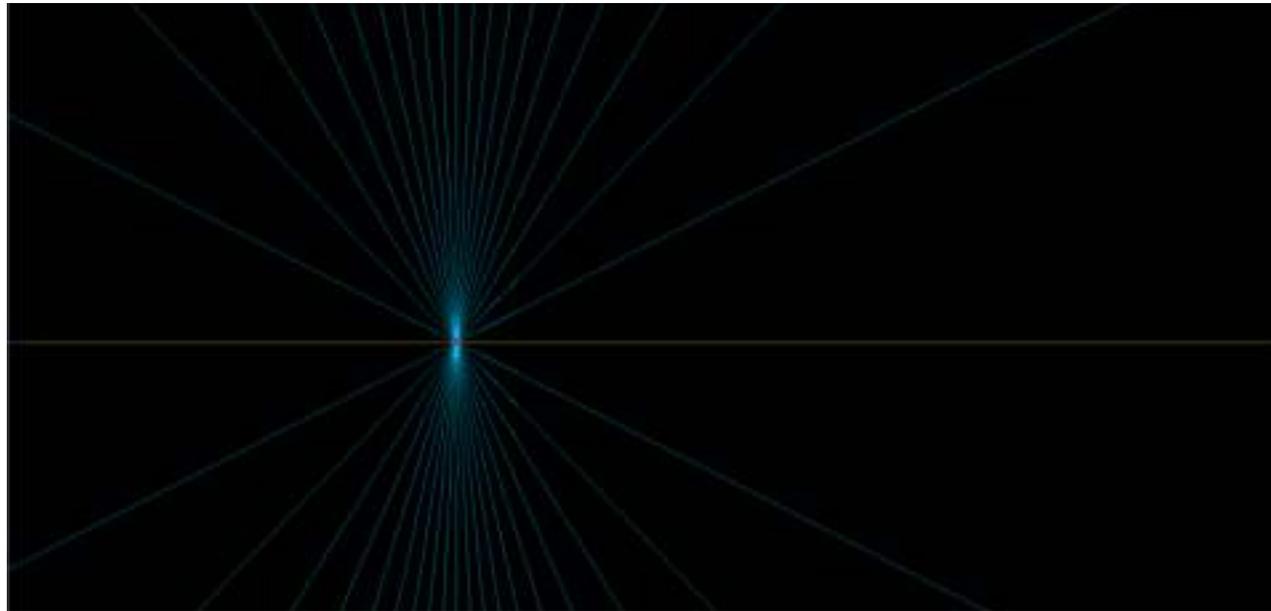
RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE



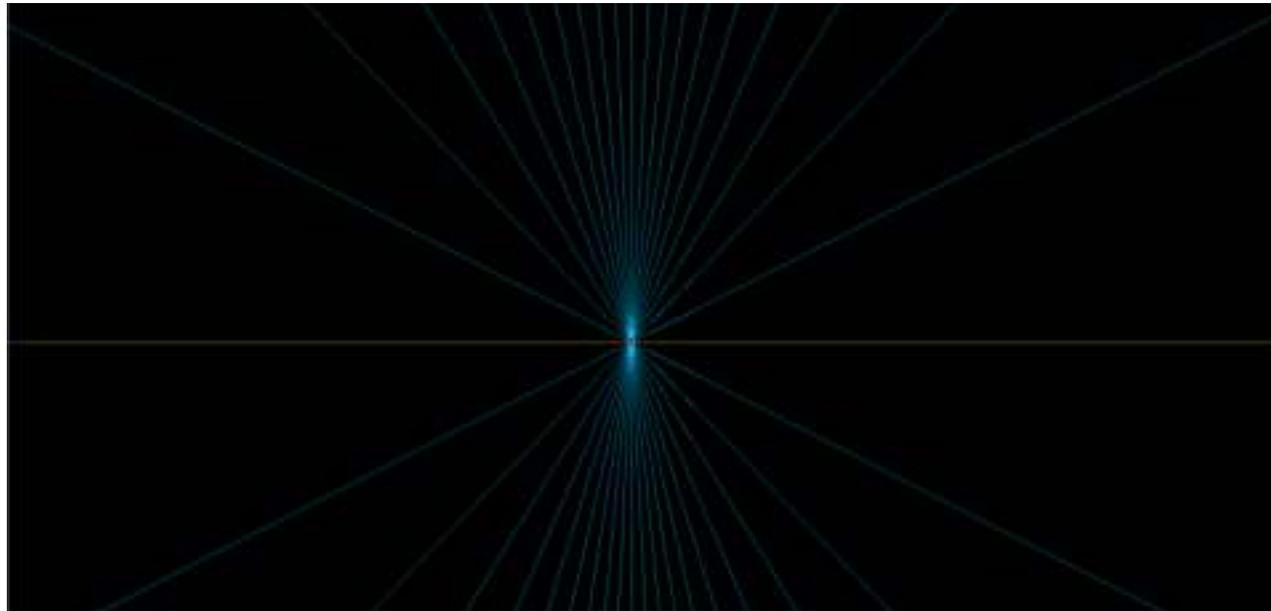
RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE



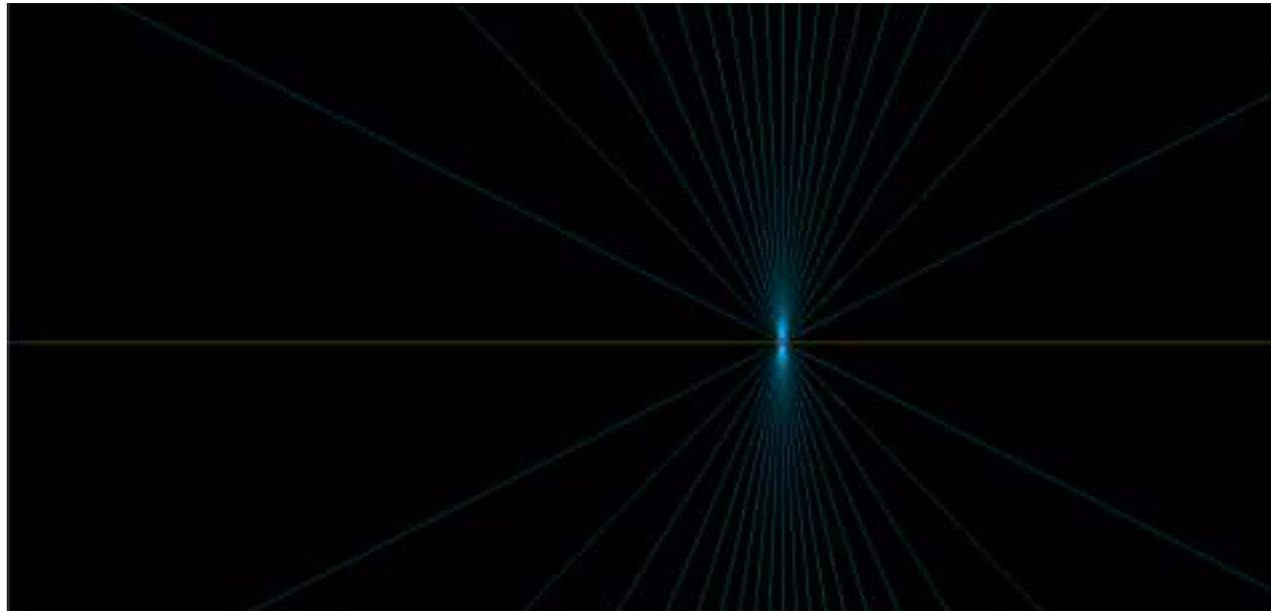
RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE



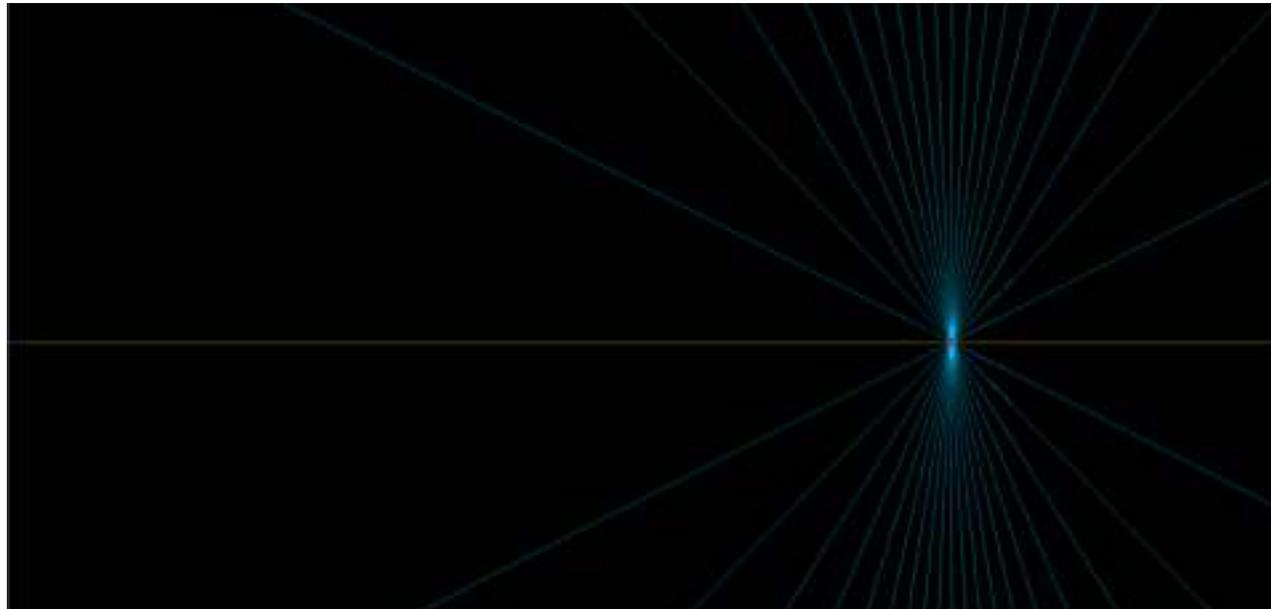
RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE



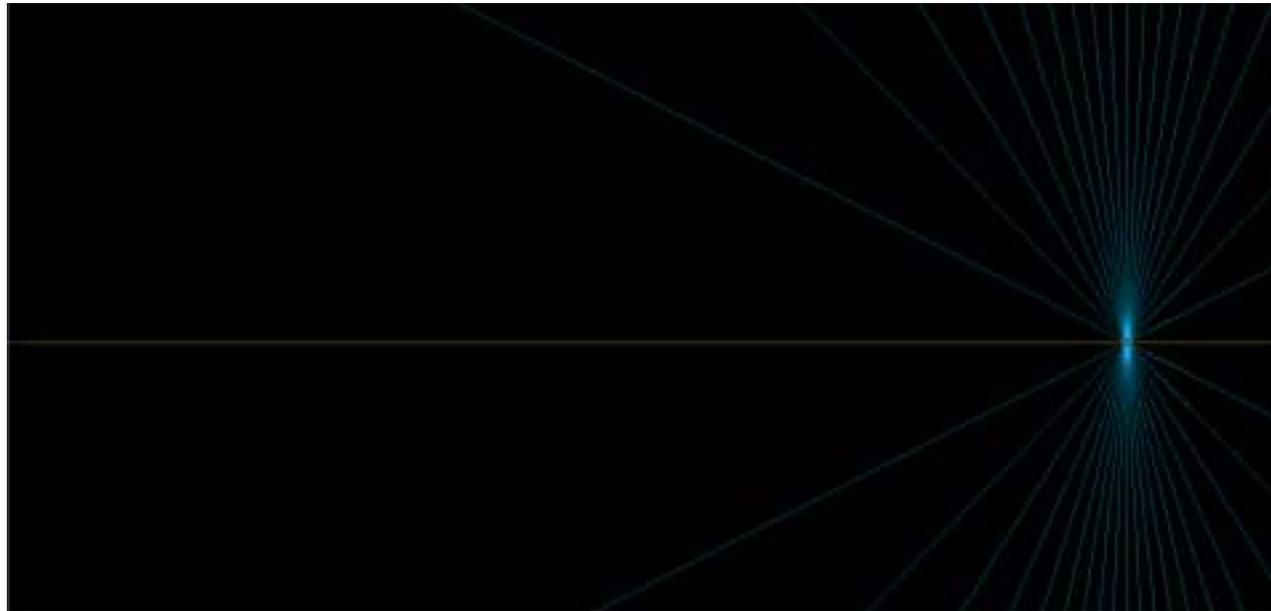
RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE



RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE



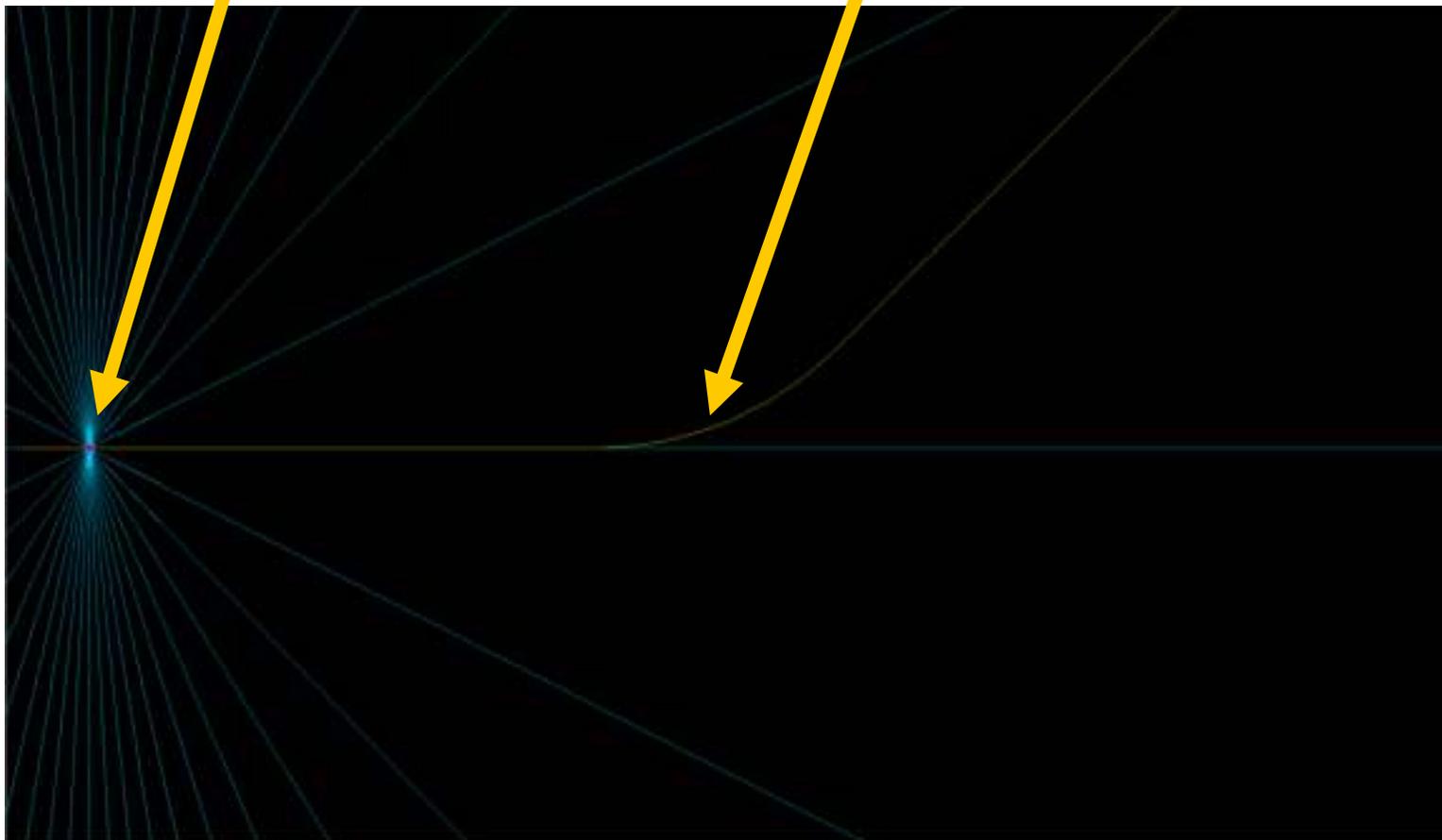
RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE



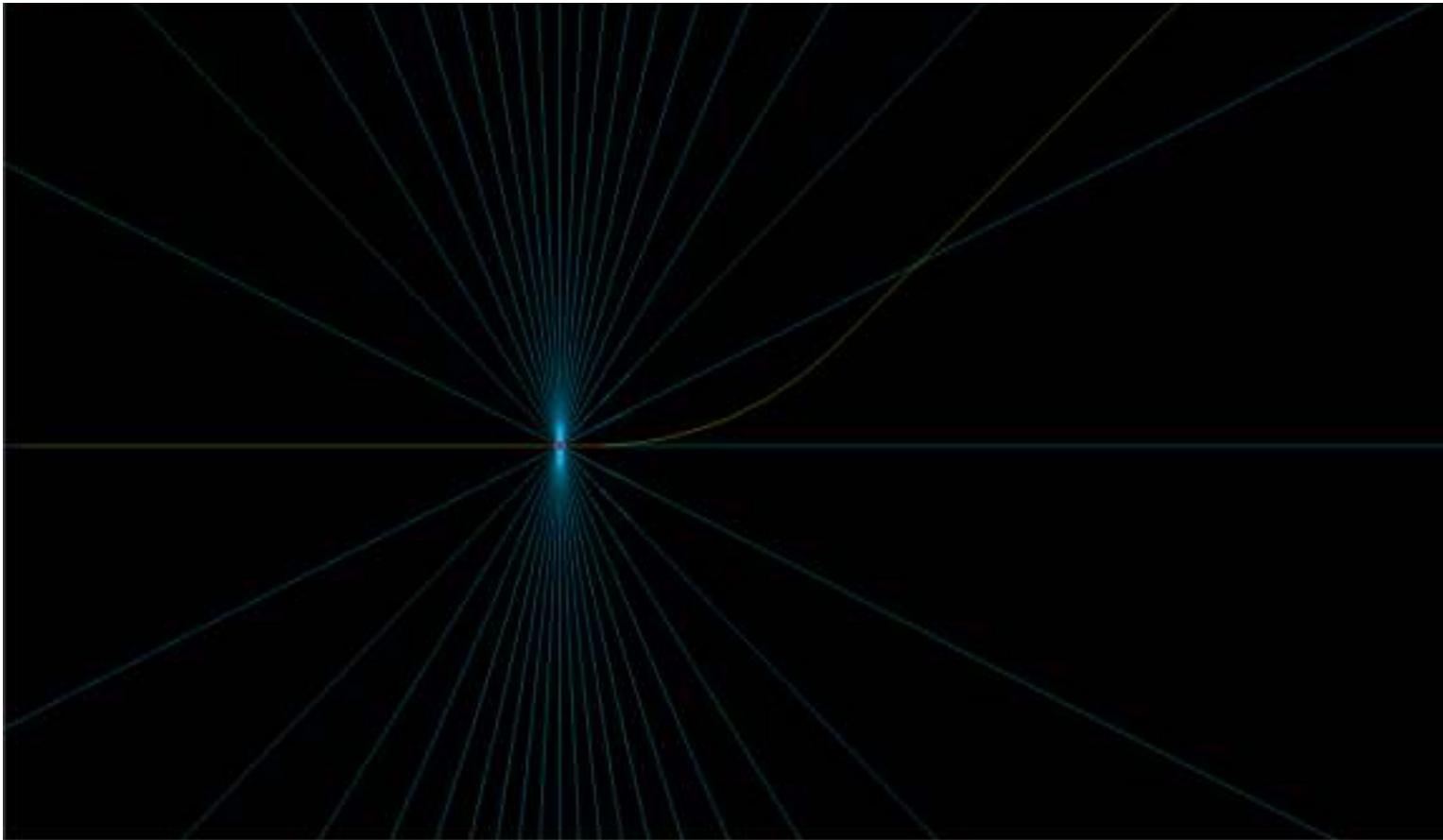
RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: DIPOLO

Carica in movimento

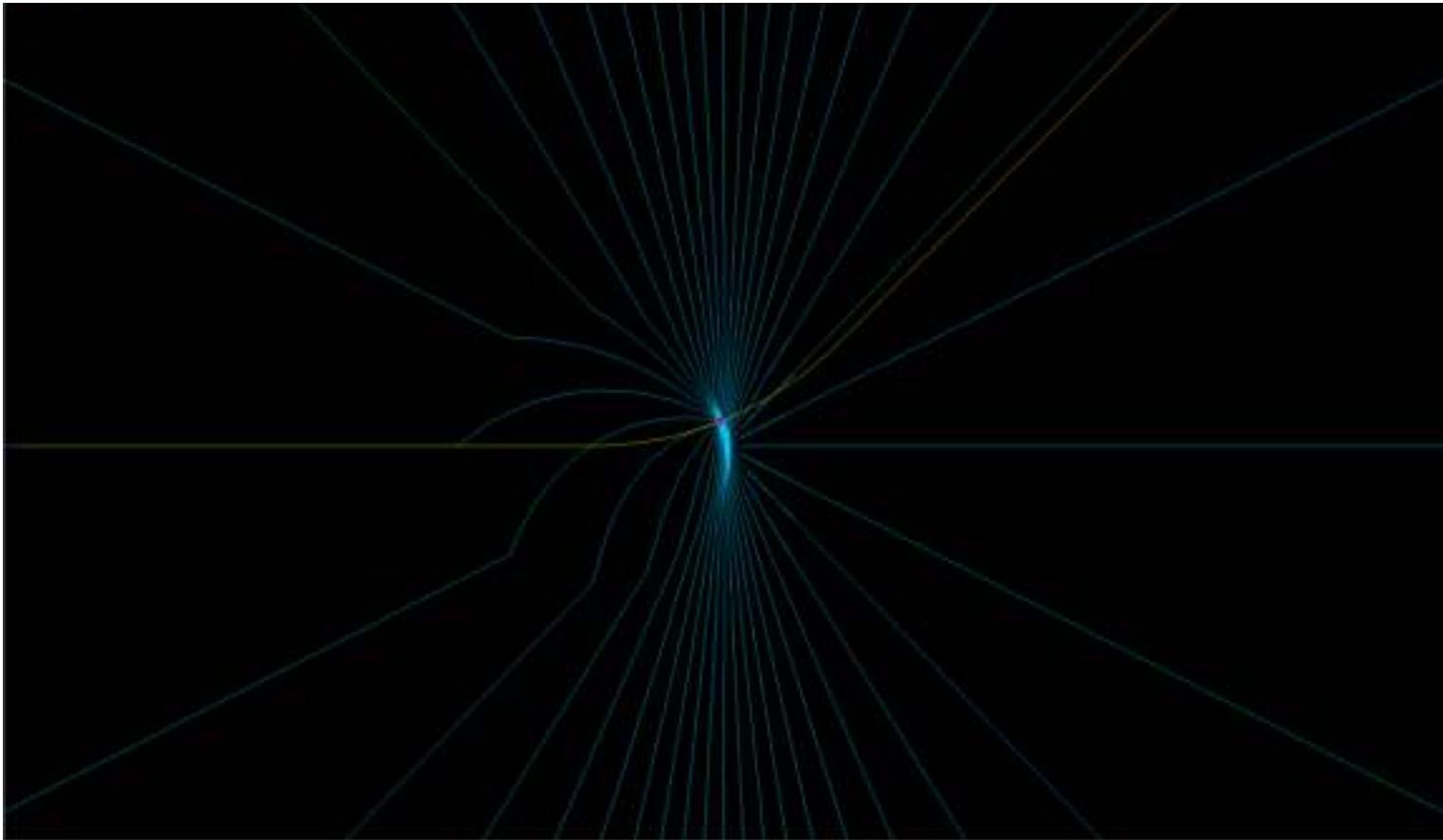
Traiettoria
generata da un
dipolo



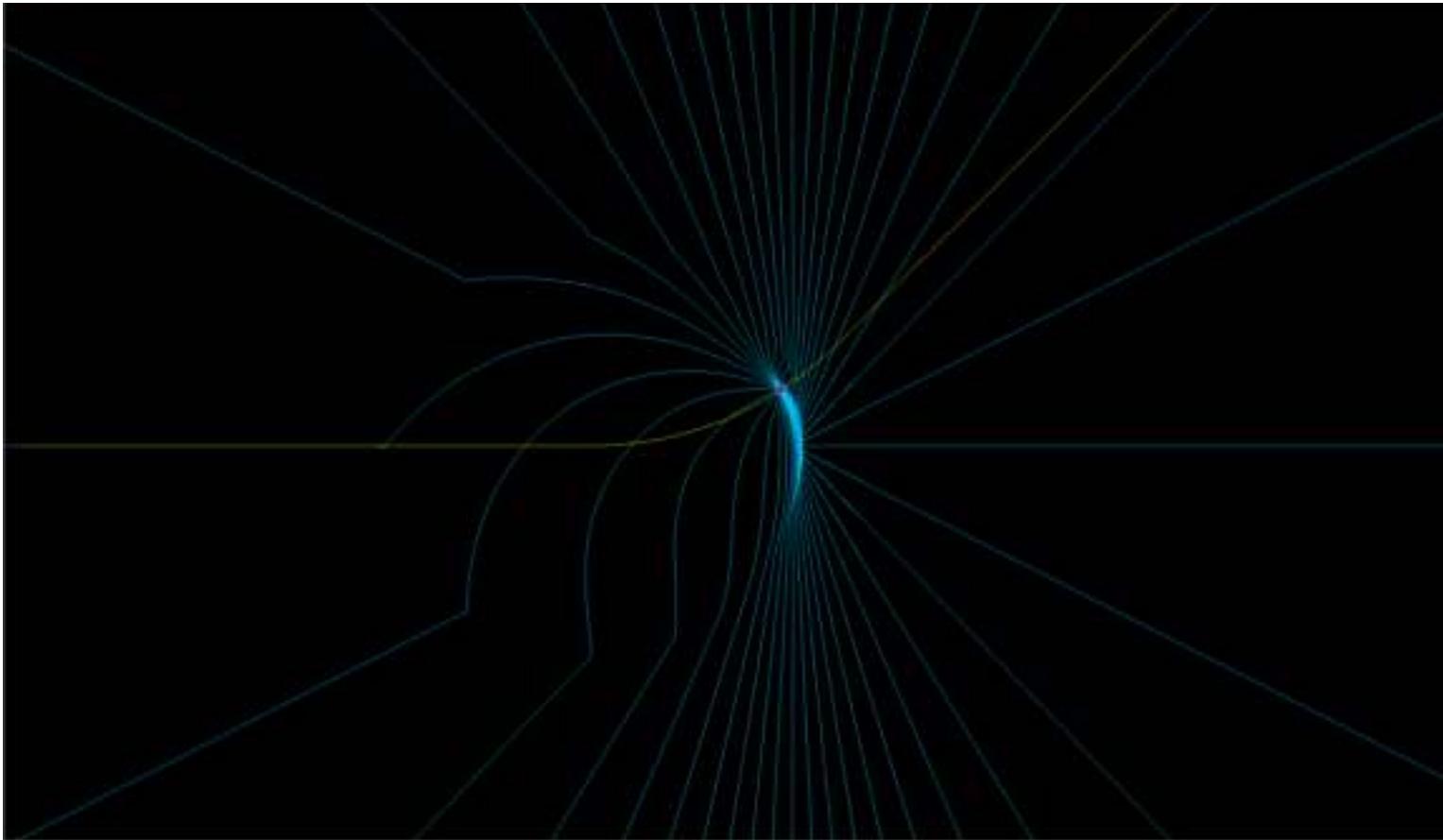
RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: DIPOLO



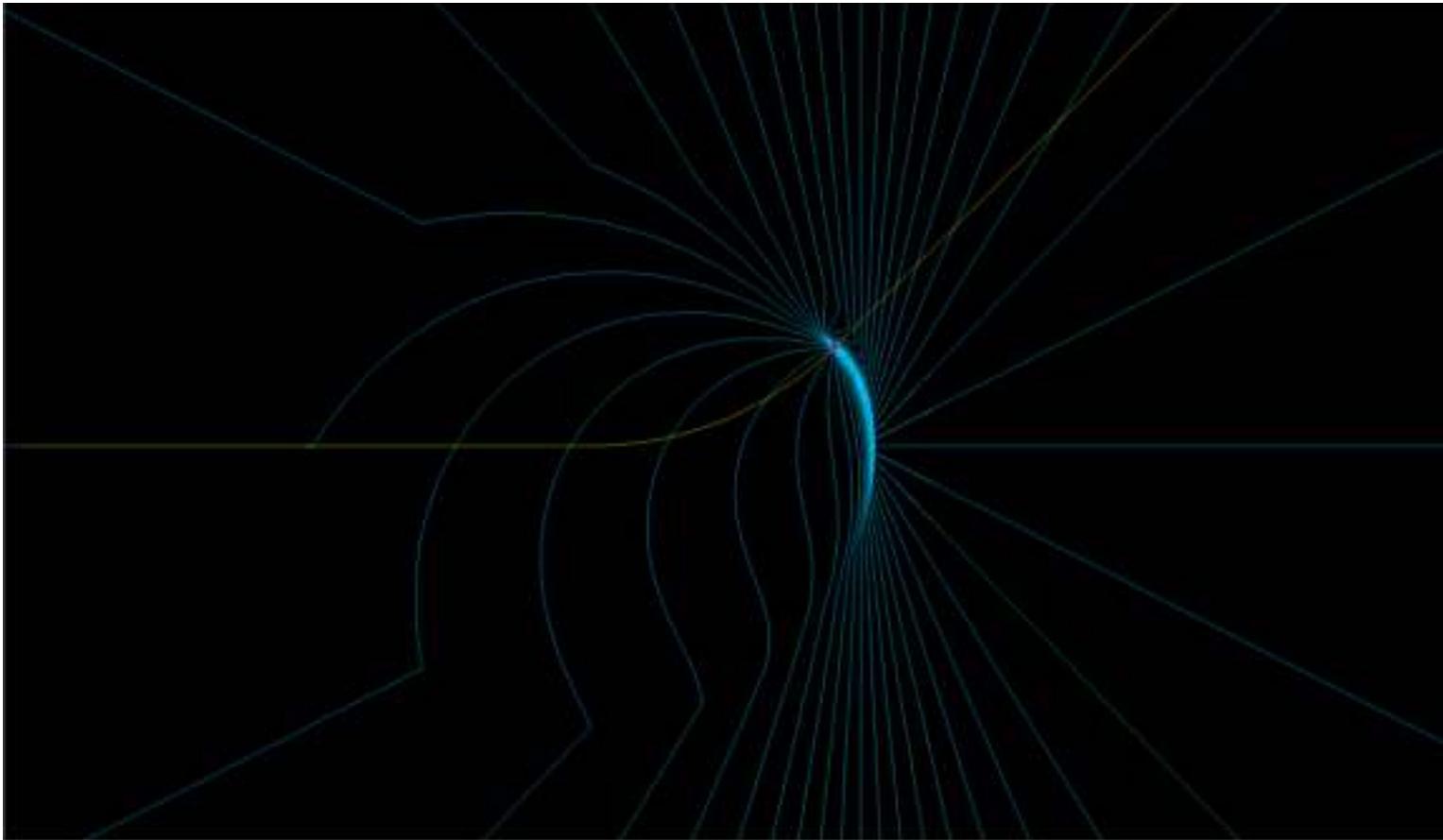
RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: DIPOLO



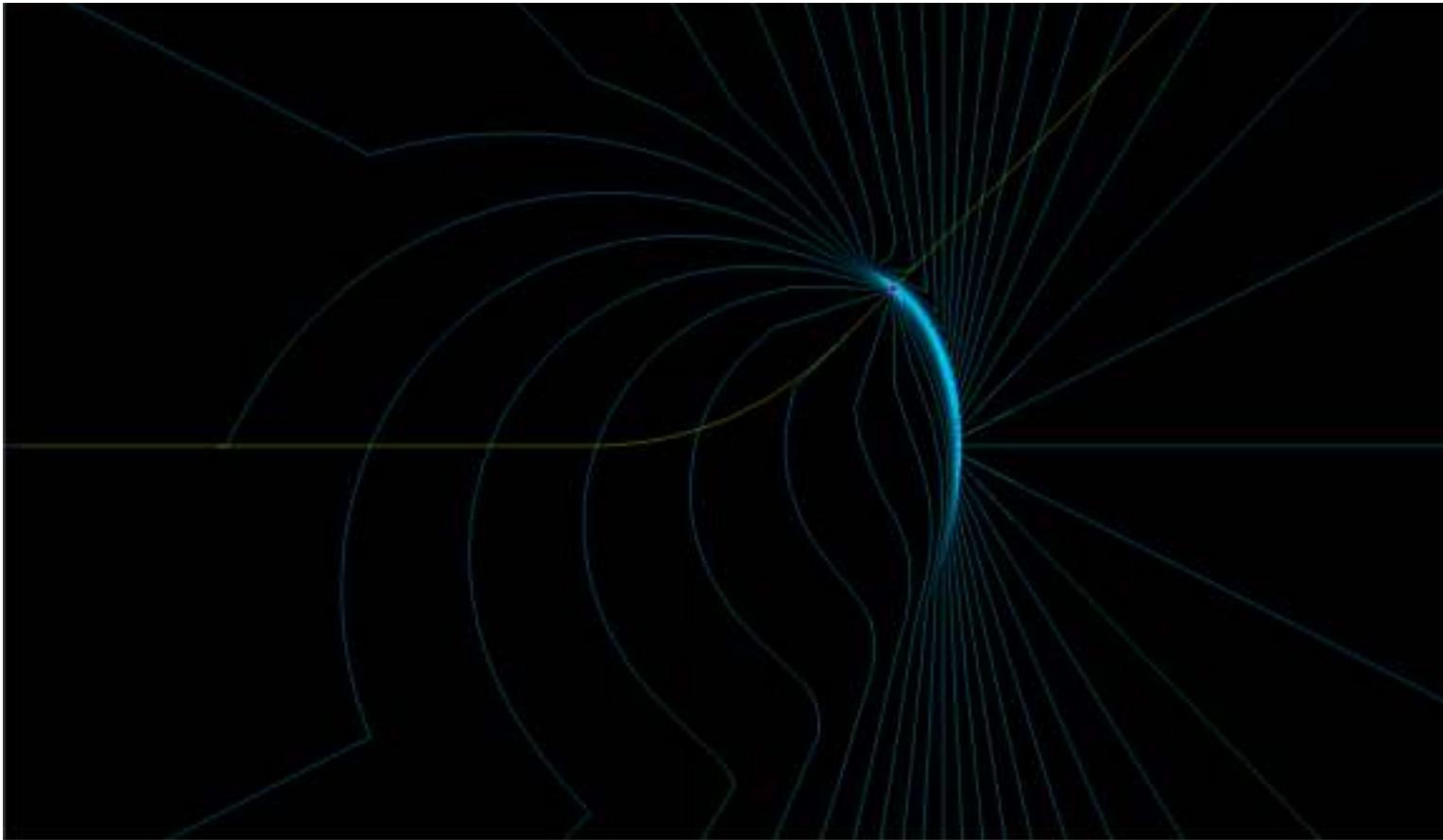
RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: DIPOLO



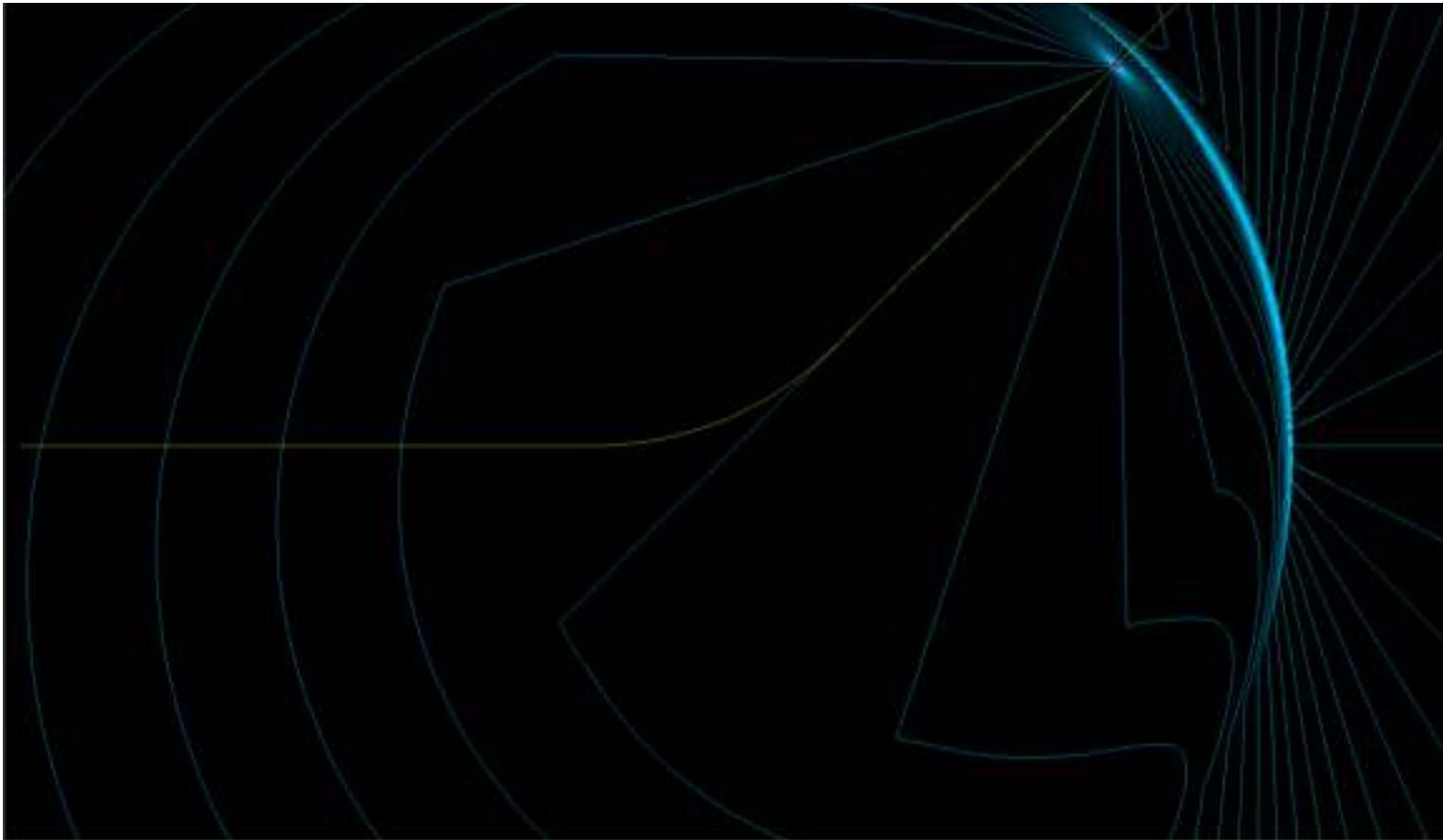
RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: DIPOLO



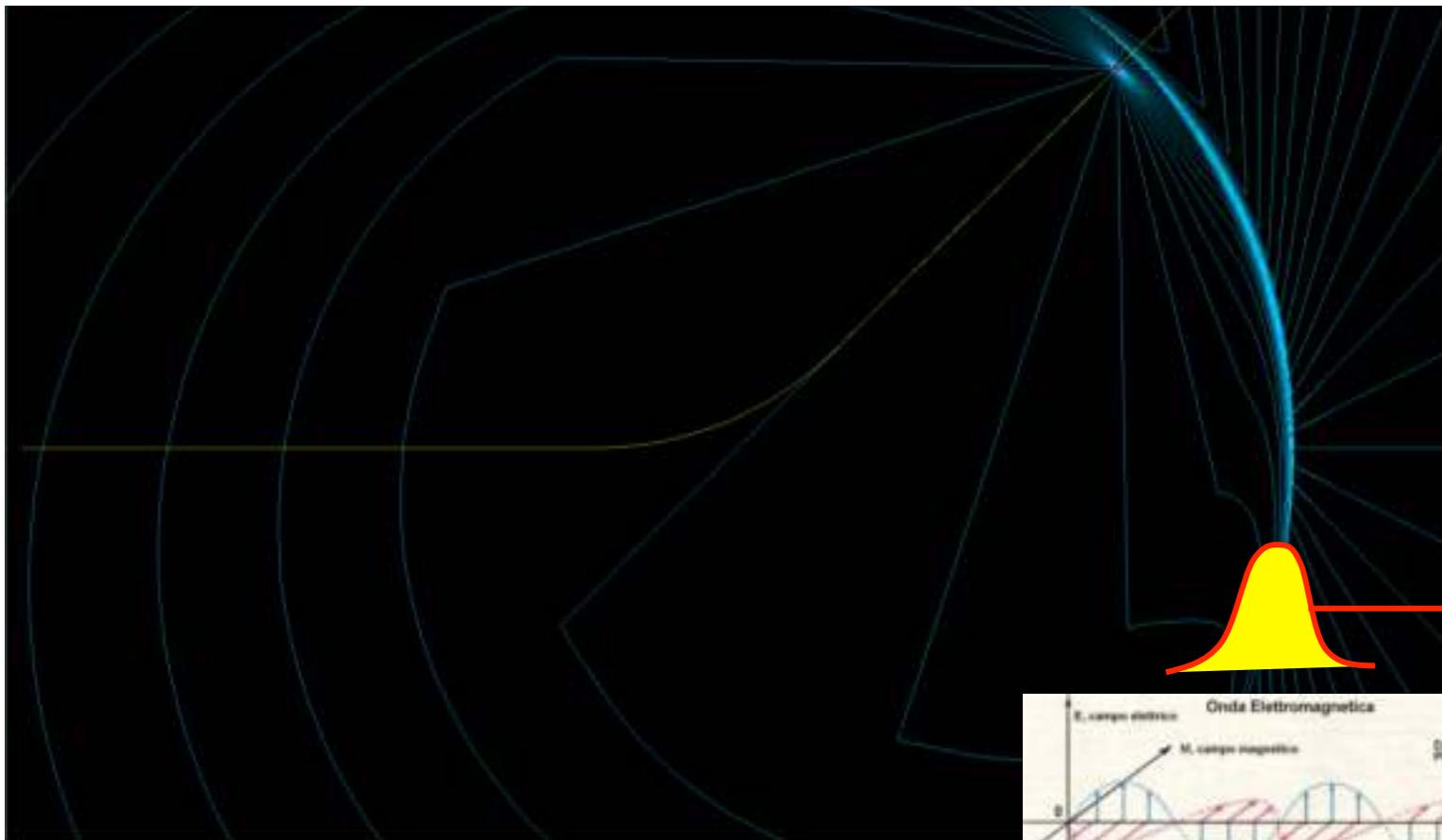
RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: DIPOLO



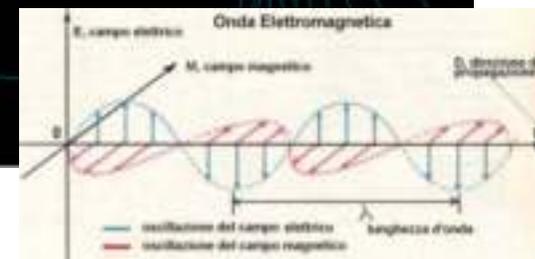
RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: DIPOLO



RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: DIPOLO

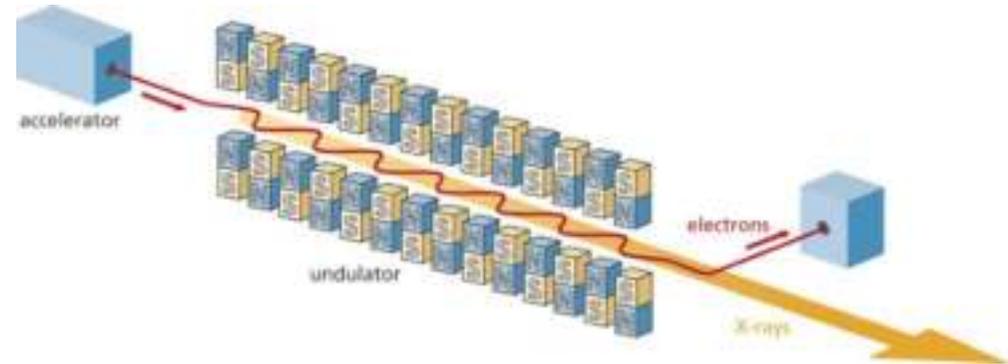


Onda piana



RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: ONDULATORE

Carica in movimento

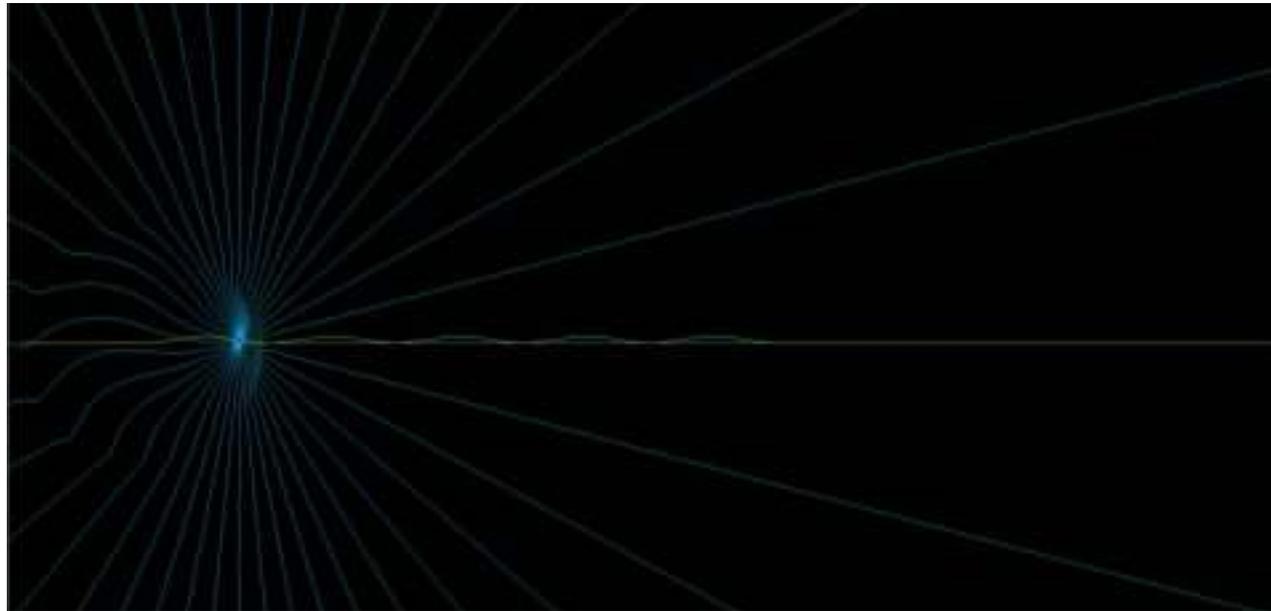


Traiettoria in un
ondulatore

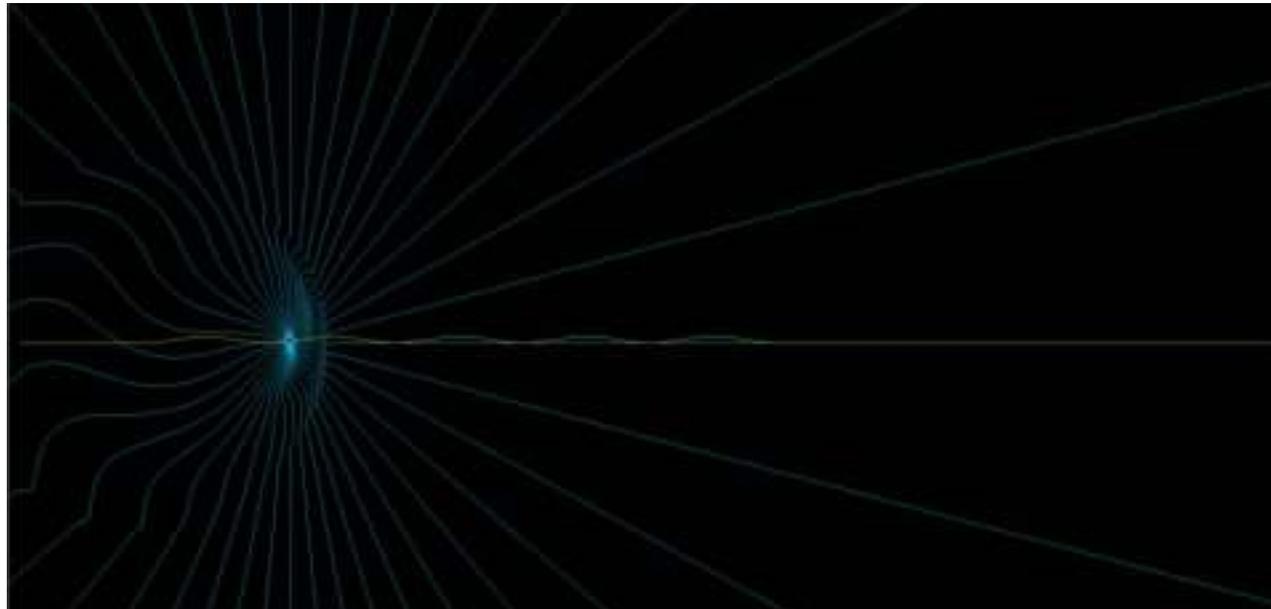
RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: ONDULATORE



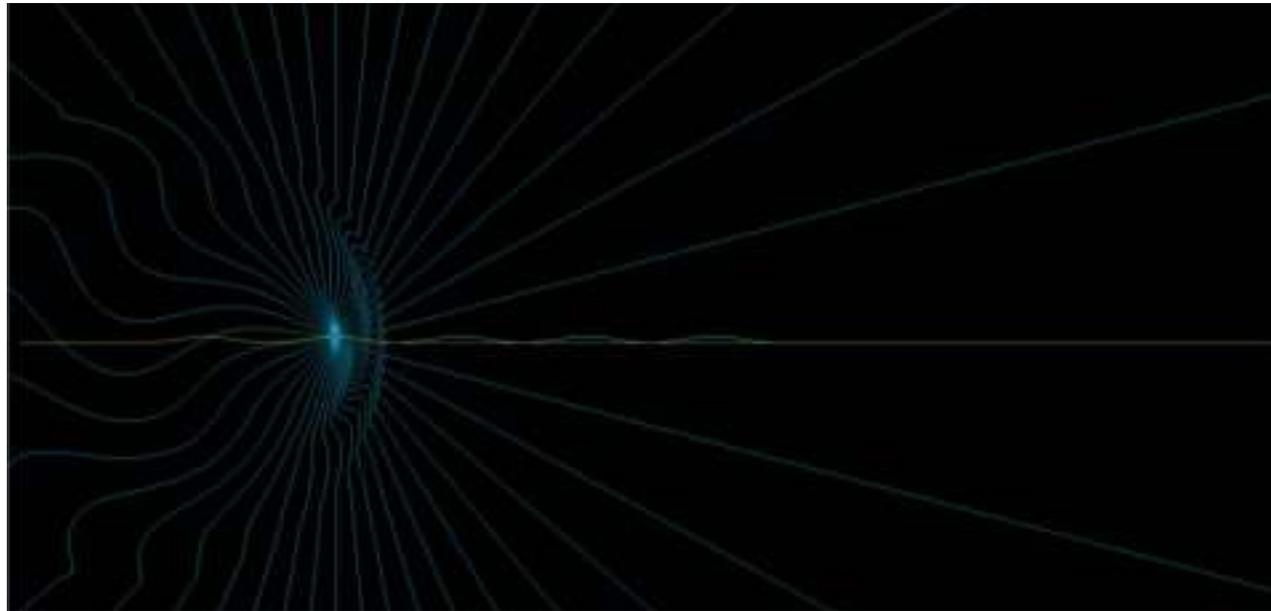
RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: ONDULATORE



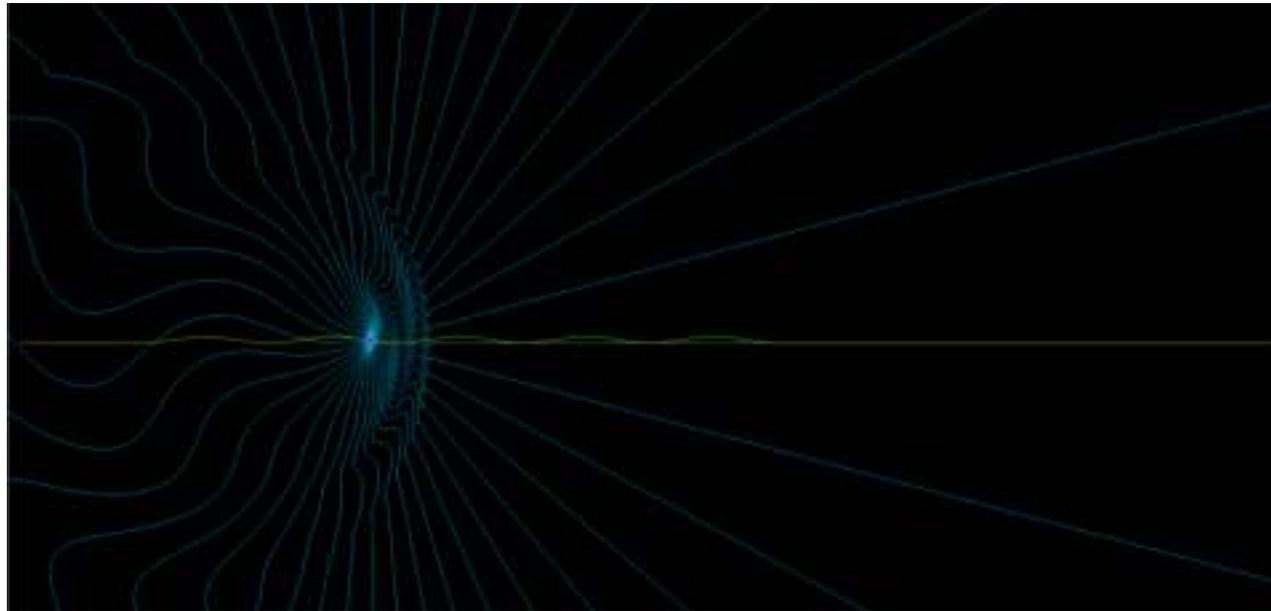
RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: ONDULATORE



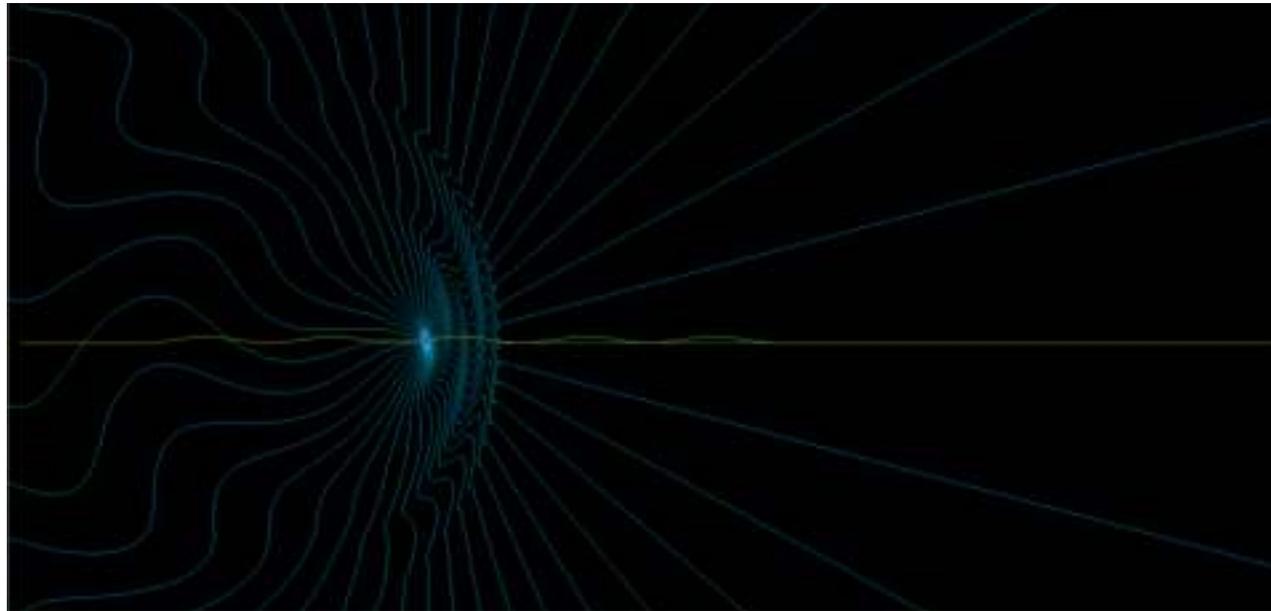
RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: ONDULATORE



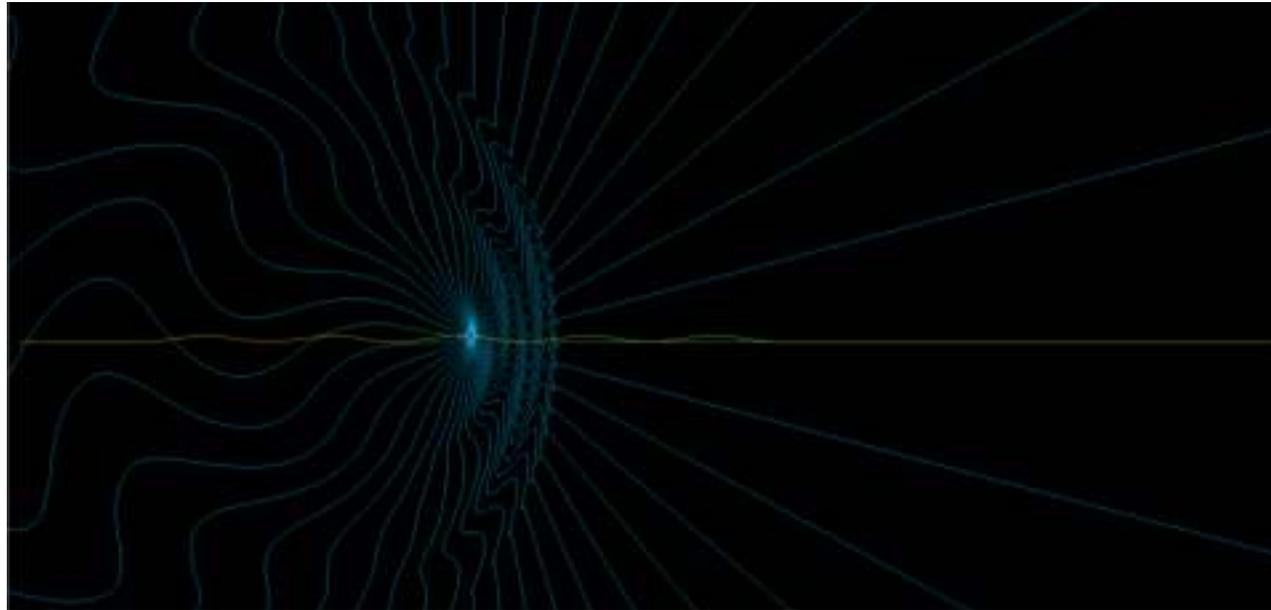
RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: ONDULATORE



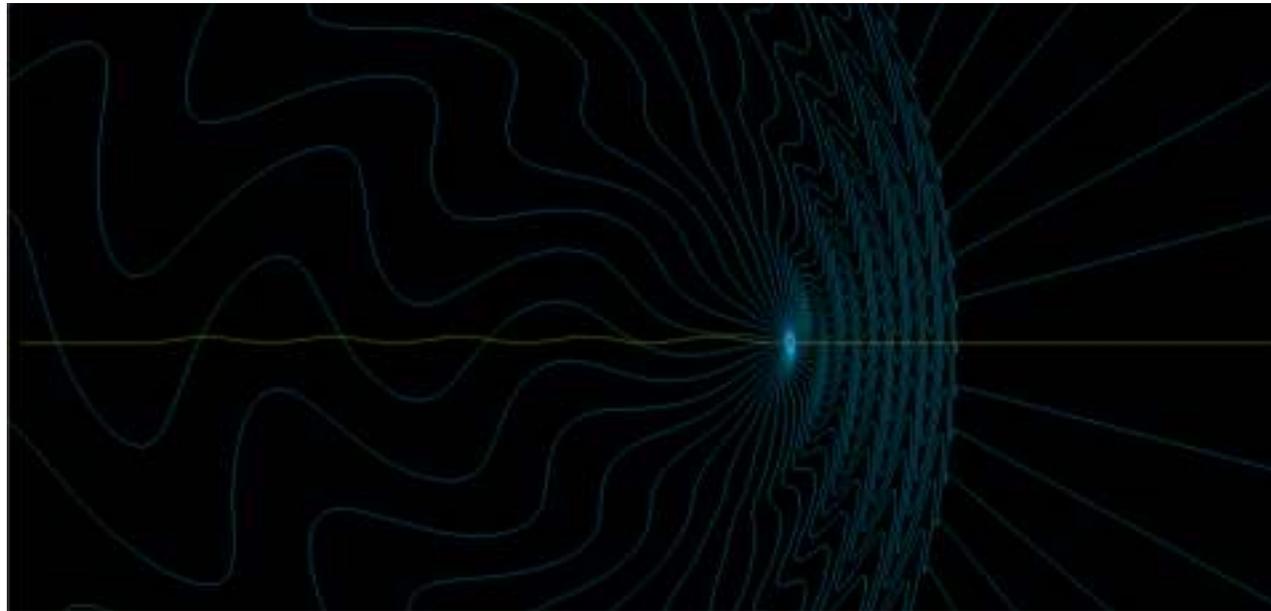
RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: ONDULATORE



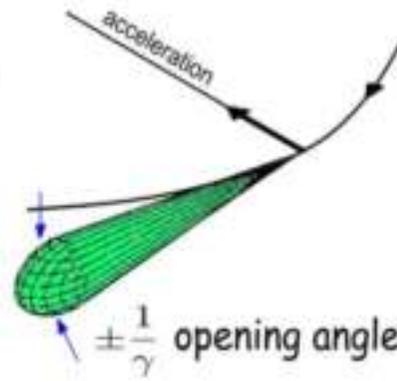
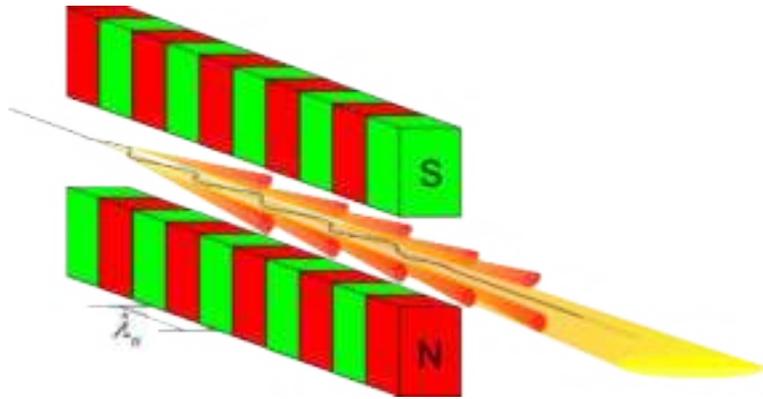
RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: ONDULATORE



RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: ONDULATORE



RADIAZIONE DA PARTICELLE CARICHE ULTRARELATIVISTICHE: ONDULATORE



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

